



Supported by:



MINISTÉRIO DE
MINAS E ENERGIA



on the basis of a decision
by the German Bundestag

Mapeamento do Setor de Hidrogênio Brasileiro

Panorama Atual e Potenciais para o Hidrogênio Verde



Imprint

Commissioned and published by:

Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit
(GIZ) GmbH
Registered offices: Bonn and Eschborn, Germany

Project: Bilateral Energy Partnerships in Developing and Emerging Countries

Contact: German-Brazilian Energy Partnership
SCN Quadra 01, Bloco C, Sala 1501

70711-902 Brasília – DF, Brazil

Kristina Kramer

E-mail: kristina.kramer@giz.de

Stéphanie Gomes

E-mail: stephanie.gomes@giz.de

Website: www.energypartnership.com.br

Tel.: +55 61 2101 2170

Câmara de Comércio e Indústria Brasil-Alemanha - Rio de Janeiro

Contact: Av. Graça Aranha 1, 6º andar, Centro. Rio de Janeiro, RJ

E-mail: info@ahk.com.br

Website: www.ahkrio.com.br

Tel.: +55 21 2224-2123

As at

27/10/2021

Design

Vaz Gontijo Consultoria, Brasília
Edelman GmbH, Berlin

Photo credits

P. 51 (left): © COPPE/UFRJ

P. 51 (right): © Mônica Saraiva Panik

Text

Câmara de Indústria e Comércio Brasil-Alemanha do Rio de Janeiro (AHK Rio de Janeiro)

Loana von Gaevernitz Lima - Diretora Executiva Adjunta,
Entrada no Mercado e Desenvolvimento de Negócios

Ansgar Pinkowski - Gerente de Energia e Sustentabilidade
(ExperTS)

Natalia Chaves - Assistente de Formação Profissional e
Sustentabilidade

SAE BRASIL

Daniel Lopes - Consultor de Hidrogênio e Energias
Renováveis

Mônica Saraiva Panik - Consultora de Hidrogênio e
Energias Renováveis

Maria do Rosário Hurtado - Consultora de Hidrogênio e
Energias Renováveis

José Antônio D. Rossi - Consultor de Hidrogênio e Energias
Renováveis

Camilo Adas - Presidente do Conselho Executivo

With contribution of

Associação Brasileira de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação do Hidrogênio (ABH2), Grupo de Estudos do Setor Elétrico (GESEL / UFRJ), Associação Brasileira da Indústria de Máquinas e Equipamentos (ABIMAQ), Associação Brasileira de Energia Eólica (ABEEólica), Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (ABSOLAR), Linde/White Martins, Air Liquide, Air Products, Messer, Thyssenkrupp do Brasil.

Revision

Carlos Alexandre Príncipe Pires, Diretor do Departamento de Desenvolvimento Energético do Ministério de Minas e Energia

Samira Sana Fernandes de Sousa Carmo, Coordenadora-Geral de Eficiência Energética do Ministério de Minas e Energia

GIZ is responsible for the content of this publication.

On behalf of the
Federal Ministry for Economic Affairs and Energy (BMWi)

Conteúdo

Glossário	5
Lista de figuras	7
Lista de tabelas	9
Resumo executivo	10
Executive summary	11
Introdução	12
Metodologia	14
1. Sobre o hidrogênio	16
1.1. Características	16
1.2. Classificação e produção	17
1.3. Distribuição	18
1.4. Consumo	19
1.5. Potenciais aplicações de hidrogênio verde	21
1.6. Perspectivas de custo de produção e distribuição	26
2. Hidrogênio verde no mundo – Estudos de caso	29
2.1. Estados Unidos	32
2.2. União Europeia	34
2.3. Países Baixos	35
2.4. Alemanha	36
2.5. Portugal	37
2.6. França	38
2.7. Austrália	39
2.8. Chile	40
2.9. Coreia do Sul	41
2.10. Arábia Saudita	42
2.11. China	43

3. Hidrogênio no Brasil	44
3.1. O mercado atual de hidrogênio	44
3.2. Panorama das políticas públicas	47
3.3. Pesquisa, desenvolvimento & demonstração	49
3.4. Projetos nacionais em hidrogênio verde	51
3.5. Potencial de produção de hidrogênio verde para consumo local e exportação	55
3.6. Mapeamento	64
4. Pesquisa com os principais atores no mercado brasileiro de hidrogênio	74
4.1. Introdução	74
4.2. Principais resultados obtidos	76
4.3. Considerações adicionais sobre os resultados obtidos	79
5. Recomendações para o desenvolvimento de uma economia de hidrogênio verde no Brasil	81
5.1. Análise SWOT	81
5.2. Síntese dos principais desafios e recomendações	83
6. Conclusão	87
7. Final considerations	89
Referências	91
Anexo I – Questionário de pesquisa de opinião	100
Anexo II – Normatização em andamento para as tecnologias de hidrogênio ..	112
Anexo III – Roteiro de entrevistas	113

Glossário

°C	Grau Celsius	DRI	<i>Direct Reduced Iron</i> (Ferro reduzido direto)
ABH2	Associação Brasileira de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação do Hidrogênio	eCH4	Gás Natural sintético
Afhypac	<i>L'Association Française pour l'Hydrogène et les Piles à Combustible</i> (Associação Francesa de Hidrogênio e Pilhas a Combustível)	EMTU	Empresa Metropolitana de Transportes Urbanos de São Paulo
AHK Rio	Câmara de Comércio e Indústria Brasil Alemanha do Rio de Janeiro	EN-H2	Estratégia Nacional para o Hidrogênio de Portugal
ANDA	Associação Nacional para Difusão de Adubos	EPE	Empresa de Pesquisa Energética
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica	EUA	Estados Unidos da América
bar	bar - unidade de pressão	EUR	Euro
BMBF	<i>Bundesministerium für Bildung und Forschung</i> (Ministério Federal Alemão de Educação e Pesquisa)	EV	<i>Electric Vehicle</i> (Veículo totalmente elétrico)
CADE	Conselho Administrativo De Defesa Econômica	ESG	<i>Environmental, social and corporate governance</i>
CAFCP	<i>California Fuel Cell Partnership</i> (Parceria Californiana de Pilhas a Combustível)	FCH JU	<i>Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking</i>
CCS	<i>Carbon Capture and Storage</i>	FCHEA	<i>Fuel Cell and Hydrogen Energy Association</i>
CENPES	Centro de Pesquisas e Desenvolvimento Leopoldo A. Miguez de Mello	FCEVs	<i>Fuel Cell Equiped Vehicle</i> (Veículo elétrico equipado a pilha a combustível)
CEO	<i>Chief Executive Officer</i>	FCV	<i>Fuel Cell Vehicle</i> (Veículo elétrico a pilha combustível de hidrogênio)
CGH	Central Geradora Hidrelétrica	FINEP	Financiadora de Estudos e Projetos do Ministério de Ciência e Tecnologia
CH4	Metano	GEE	Gases de efeito estufa
CHP	Calor e Energia	GEF	<i>Global Environment Facilities</i>
CNTP	Condições normais de temperatura e pressão	GNL	Gás Natural Liquefeito
CO₂	Dióxido de Carbono, Gás Carbônico	Gt	Gigatonelada
CO_{2e}	Equivalente de dióxido de carbono	GW	Gigawatt
CGH	Central Geradora Hidrelétrica	GWh	Gigawatt-hora
CNPT	Condições normais de temperatura e pressão	H₂	Hidrogênio
COPPE-UFRJ	Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, da Universidade Federal do Rio de Janeiro	HDS	Hidrodessulfurização
CT&I	Ciência, tecnologia e inovação	HRS	<i>Hydrogen Refueling Station</i>
DOE	<i>Department of Energy</i> (Departamento de Energia dos Estados Unidos)	HVO	Óleo Vegetal Hidrogenado
		IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
		IEA	Agência Internacional de Energia
		IFA	<i>International Fertilizer Association</i>

IRENA	<i>International Renewable Energy Agency</i> (Agência Internacional de Energias Renováveis)	N,P,K	Fertilizante NPK - Nitrogênio (N), Fósforo (P) e Potássio (K)
kg	Quilograma	NSG	<i>Nippon Sheet Glass</i>
km	Quilômetro	NWS	Estratégia Nacional para o Hidrogênio da Alemanha
KOSPO	<i>Korean Southern Power Company</i>	ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
KRW	Won - moeda sul-coreana	p.	página
kW	Quilowatt	PCH	Pequena Central Hidrelétrica
kWh	Quilowatt-hora	P&D	Pesquisa e Desenvolvimento
kWp	Quilowatt-pico	PD&D	Pesquisa e Desenvolvimento e Demonstração
LabH2	Laboratório de Hidrogênio da Universidade Federal do Rio de Janeiro	P,D&I	Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação
LAP	<i>Legal and Administrative Process</i>	Petrobras	Petróleo Brasileiro S.A.
LH2	Laboratório de Hidrogênio da Universidade Estadual de Campinas	PEM	Membrana Polimérica Eletrolítica
LH₂	Hidrogênio líquido	PIA - Produto	Pesquisa Industrial Anual - Produto
LOHC	<i>Liquid Organic Hydrogen Carrier</i> (Transportador de hidrogênio orgânico líquido)	PIB	Produto Interno Bruto
m³	Metro cúbico	PNUD	Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento
MME	Ministério de Minas e Energias	PtX	<i>Power-to-X</i>
MOTIE	Ministério do Comércio, Indústria e Energia Sul-Coreano	RC	Reforma catalítica
MoU	Memorando de entendimento	R\$	Reais
MPa	Megapascal - unidade de pressão	SAE BRASIL	Sociedade de Engenharia da Mobilidade no Brasil
MPA	Associação de Produtos Minerais	SMR	<i>Steam Methan Reforming</i> (reforma a vapor de gás natural)
Mt	Megatons (Milhão de toneladas)	SO₂	Dióxido de enxofre
Mt/yr	Tonelada métrica por ano	SO_x	Óxidos de enxofre
MCT	Ministério da Ciência e Tecnologia (atual MCTI)	t	Tonelada
MCTI	Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações	t/ano	Tonelada por ano
MCTIC	Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações (atual MCTI)	TWh	Terawatt-hora
MMBtu	Milhão de BTU	UNFCCC	Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima
MW	Megawatt	UNICAMP	Universidade Estadual de Campinas
MWe	Megawatt Elétrico	USD	<i>Dollar</i> (dólar estadunidense)
NEDO	<i>New Energy and Industry Technology Organization</i>	VDZ	<i>Verein Deutscher Zementwerke</i> (Associação alemã de empresas de cimento)
NH₃	Amônia	WHEC 2018	<i>World Hydrogen Energy Conference 2018</i> (Conferência Mundial de Energia do Hidrogênio 2018)
Nm³	Normal Metro Cúbico		
Nm³/dia	Normal Metro Cúbico por dia		
NOx	Óxidos de nitrogênio		

Lista de figuras

Figura 1 – Fontes de geração de hidrogênio no mundo	17
Figura 2 – Consumo de H ₂ no mundo	19
Figura 3 – H ₂ verde e processos <i>Power-to-X</i>	21
Figura 4 – Impactos no preço de H ₂ verde	27
Figura 5 – Custos logísticos de H ₂ intercontinentais	28
Figura 6 – Panorama das ações em H ₂ por país	30
Figura 7 – Projetos em H ₂ no mundo	32
Figura 8 – Produção anual de H ₂ no Brasil	44
Figura 9 – Produção de H ₂ na Petrobras	45
Figura 10 – Localização dos parques de refino no Brasil	45
Figura 11 – Geração e consumo de hidrogênio no Brasil 2014 - 2018	45
Figura 12 – Infraestrutura de produção e movimentação de gás natural 2019	46
Figura 13 – Ações governamentais para o H ₂ no Brasil	48
Figura 14 – Segmentação de projetos P&D em H ₂ no Brasil por temas	50
Figura 15 – Protótipo ônibus a H ₂ COPPE/UFRJ	51
Figura 16 – Ônibus movido a pilha a combustível a H ₂ para transporte urbano	51
Figura 17 – Exportação de H ₂ verde do Projeto Base One - Ceará	54
Figura 18 – Participação mundial de fontes renováveis na geração elétrica em 2019	55
Figura 19 – Principais rotas tecnológicas H ₂ verde no Brasil	56
Figura 20 – Distribuição geográfica: geração eólica	56
Figura 21 – Distribuição geográfica: geração solar fotovoltaica	56
Figura 22 – Distribuição geográfica: PCHs e CGHs	57
Figura 23 – Distribuição geográfica: UHEs	57
Figura 24 – Produção de etanol	58
Figura 25 – Produção de biogás	58

Figura 26 – Produção de biodiesel	59
Figura 27 – Disponibilidade de resíduos nas diferentes regiões	59
Figura 28 – Custos de geração de H ₂ verde a partir de fontes eólica e solar	62
Figura 29 – Produção de grãos e consumo de fertilizantes	63
Figura 30 – Principais atores da cadeia de valor de hidrogênio	74
Figura 31 – Estrutura do questionário sobre H ₂ verde	75
Figura 32 – Faturamento das empresas participantes	76
Figura 33 – Respostas ao questionário por categoria	76
Figura 34 – Intenção sobre recuperação verde	76
Figura 35 – Conhecimento sobre H ₂ verde	77
Figura 36 – Interesse em geração própria	77
Figura 37 – Conhecimento do tema por categoria de empresa	77
Figura 38 – Competitividade brasileira no mercado mundial de H ₂ verde	78
Figura 39 – Expectativa para o H ₂ verde se tornar comercialmente competitivo	78
Figura 40 – Expectativa para o H ₂ verde se tornar comercialmente competitivo por porte do respondente	78
Figura 41 – Percepção sobre as principais barreiras	79
Figura 42 – Incentivos necessários	80

Lista de tabelas

Tabela 1 – Cenários de demanda de importação de H ₂ – Alemanha e União Europeia	18
Tabela 2 – Resumo das principais tecnologias PtX	22
Tabela 3 – Objetivos específicos das estratégias nacionais	31
Tabela 4 – Capacidade instalada de geração elétrica no Brasil (MW) – Fontes Renováveis	55
Tabela 5 – Geração elétrica por fonte no Brasil (GWh) – Fontes Renováveis	60
Tabela 6 – Consumo por classe (GWh)	60
Tabela 7 – Saldo entre Geração Renovável e Consumos Totais (GWh)	61
Tabela 8 – Saldo entre Geração Renovável e Consumo Industrial e Residencial (GWh)	61
Tabela 9 – Evolução da composição da capacidade instalada total por fonte (GW)	61
Tabela 10 – Produtores de H ₂ verde	65
Tabela 11 – Consumidores de H ₂ verde	66
Tabela 12 – Fornecedores de tecnologias de H ₂ verde e PtX	68
Tabela 13 – Prestadores de Serviço de H ₂ verde	71
Tabela 14 – Representações setoriais de H ₂ verde	72
Tabela 15 – Universidades e Centro de P&D de H ₂	73
Tabela 16 – Análise SWOT H ₂ verde	81

Tabela de conversão de moedas*

1 USD	5,16 R\$
1 EUR	5,93 R\$
1 EUR	1,15 USD

* Baseado na média cambial anual para o ano de 2020.

Fonte: Sistema de Gerenciamento de Séries Temporais do Banco Central do Brasil.

Resumo executivo

O estudo realiza um mapeamento da indústria e dos principais atores acadêmicos e institucionais como uma preparação para um *roadmap* brasileiro de hidrogênio verde. Além disso, é apresentada uma visão geral sobre as principais tecnologias de aplicação de hidrogênio verde e PtX e o seu estado de maturidade no Brasil em comparação aos países líderes nessas tecnologias.

Dessa forma, o estudo traz um panorama do atual setor de hidrogênio no Brasil bem como das potencialidades para o desenvolvimento de mercados interno e para exportação de hidrogênio verde. Por meio de extensa pesquisa bibliográfica e entrevistas com especialistas, buscou-se responder às seguintes perguntas chaves:

- Qual é o consumo atual de hidrogênio no Brasil e quais são os seus principais consumidores?
- Qual é a produção? Quem são os principais produtores e quais são as localidades de produção de hidrogênio verde?
- Quais são as principais tecnologias de geração de hidrogênio e PtX usadas no Brasil e qual é a previsão de desenvolvimento no cenário atual na matriz brasileira?
- Quais são os principais “stakeholders” no Brasil ao longo da cadeia de valor de hidrogênio verde e o produto de segmento PtX (empresas, representantes de indústria, institutos de pesquisa, órgãos governamentais, entre outros)?
- Qual é o posicionamento da indústria brasileira a respeito da introdução de hidrogênio verde na matriz energética brasileira?
- Em quais setores e áreas o hidrogênio verde poderia ser aproveitado como insumo energético (tanto consumo como armazenamento) no Brasil?

Inicialmente são fornecidas informações básicas sobre o gás hidrogênio, volumes de geração e consumo mundiais e aplicações na atualidade. Em seguida, são apresentadas informações e potencialidades do hidrogênio verde e das tecnologias *Power-to-X*, bem como perspectivas de custos de geração e de distribuição nacional e internacional do gás.

O estudo também traz um panorama comparativo sobre as principais políticas públicas (estratégias, *roadmaps* e planos de ação) para o hidrogênio, e atuais projetos no mundo, incluindo volumes de investimento público e privado.

A contextualização inicial fornece as bases para analisar o setor de hidrogênio no Brasil e suas potencialidades. Nesse sentido, são apresentados os principais atores e volumes na cadeia de produção e consumo do gás, bem como aplicações atuais do hidrogênio no país. Também são sintetizadas as principais políticas públicas e ações no campo da pesquisa, desenvolvimento e inovação já realizadas no Brasil.

Especificamente para o hidrogênio verde, são apresentados exemplos de projetos com distintas aplicações e uma extensa análise sobre os potenciais de produção a partir de fontes de energia renováveis para consumo interno e exportação. Como estudo de caso, é apresentado um panorama sobre a indústria de fertilizantes nitrogenados e o potencial da utilização da amônia verde para a redução da dependência externa do insumo agrícola.

Um dos principais entregáveis do estudo consiste no mapeamento dos principais atores da cadeia produtiva de hidrogênio no Brasil, além da avaliação dos resultados de uma pesquisa de opinião ampla realizada com mais de 100 empresas e instituições atuantes direta e indiretamente na cadeia de valor de hidrogênio.

Por fim, o estudo reúne em uma análise SWOT, as informações e percepções apreendidas ao longo da elaboração do estudo, sintetiza os principais desafios e realiza recomendações para o desenvolvimento de uma economia de hidrogênio verde no Brasil.

Executive summary

The study conducts a mapping of the industry and key academic and institutional players as a preparation for a Brazilian green hydrogen roadmap. In addition, an overview is presented on the main green hydrogen and PtX application technologies and their state of maturity in Brazil compared to the leading countries in these technologies.

Thus, the study presents an overview of the current hydrogen sector in Brazil as well as the potentialities for developing internal and export markets for green hydrogen. By means of extensive bibliographic research and interviews with specialists the following key questions were answered:

- What is the current hydrogen consumption in Brazil and which are its main consumers?
- What are the production volumes? Who are the main producers and what are the production sites of green hydrogen?
- What are the main hydrogen and PtX generation technologies used in Brazil and what is the forecast for their development in the current scenario in the Brazilian matrix?
- Who are the main stakeholders in Brazil along the green hydrogen value chain and the follow-up product PtX (companies, industry representatives, research institutes, government agencies, among others)?
- What is the positioning of the Brazilian industry regarding the introduction of green hydrogen in the Brazilian energy matrix?
- In which sectors and areas could green hydrogen be used as energy input (both consumption and storage) in Brazil?

Initially, basic information about hydrogen gas, world generation and consumption volumes, and current applications are provided. Next, information and potentialities of green hydrogen and *Power-to-X* technologies are presented, as well as perspectives on generation and distribution costs nationally and internationally.

The study also provides a comparative overview of the main public policies (strategies, roadmaps and action plans) for hydrogen, as well as of the current projects in the world, including volumes of public and private investment.

This prior contextualization provides the basis for analyzing the hydrogen sector in Brazil and its potentialities. In this sense, the main actors and volumes in the gas production and consumption chain are presented, as well as the current hydrogen applications in the country. The main public policies and activities in the field of research, development and demonstration already carried out in the country are also synthesized.

Specifically with regards to green hydrogen, examples of projects with different applications are presented as well as an extensive analysis on the production potential from renewable energy sources for internal consumption and export. As a case study, an overview is presented of the nitrogen-based fertilizer industry and its potential use of green ammonia to reduce external dependence on this agricultural feedstock.

One of the main deliverables of the study is the mapping of the main stakeholders of the hydrogen production chain in Brazil, as well as the evaluation of the results of a broad opinion poll conducted with more than 100 companies and institutions acting directly and indirectly in the hydrogen value chain.

Finally, the study gathers in a SWOT analysis the information and perceptions obtained during the elaboration of the study, synthesizes the main challenges and formulates recommendations for the development of a green hydrogen economy in Brazil.

Introdução

Recentemente o hidrogênio tornou-se objetivo estratégico de diversos países no contexto da descarbonização das economias globais. O hidrogênio “verde”, produzido por meio de fontes renováveis de energia, é atualmente reconhecido como elemento chave para o cumprimento das metas de redução de emissões dos gases de efeito estufa (GEE) assumidas pelos países no Acordo de Paris em 2016.

Dessa forma, visando o desenvolvimento econômico sustentável por meio da descarbonização massiva de suas economias, bem como o posicionamento estratégico tempestivo em âmbito internacional para celebração de parcerias, constata-se na atualidade uma verdadeira “corrida” das nações para o estabelecimento de estratégias nacionais, *roadmaps* e planos de ação voltados para as tecnologias de hidrogênio. Tais parcerias objetivam o progresso tecnológico do hidrogênio e dos produtos *Power-to-X* (PtX), bem como a concretização de projetos para rotas comerciais internacionais de fornecimento de hidrogênio de baixa ou nula emissão.

Um estudo contratado pelo *World Energy Council* revela que ao final de 2020 cerca de 20 nações já possuíam estratégias de hidrogênio publicadas e que outros 14 países estavam apoiando projetos piloto e de demonstração de hidrogênio. Estima-se que até 2025 os países, que somados representam 80% do PIB global, irão desenvolver suas estratégias. É válido ressaltar que o hidrogênio verde é o ponto central de tais planejamentos estratégicos.

Mundialmente, o Brasil possui uma das matrizes energéticas mais limpas e está posicionado entre as 15 maiores economias. Juntamente com mais de 150 países, o Brasil também se comprometeu com metas internas para exercer sua contribuição na contenção da temperatura global em 1,5°C, por meio de uma redução de 37% nas emissões de GEE até 2025 e 43% até 2030, além de aumentar a participação de bioenergia sustentável para 18% e um aumento da participação de energias renováveis na matriz energética para 45% até 2030 (BRASIL, 2016). Nesse sentido, o estudo realiza um mapeamento da indústria e dos principais atores acadêmicos e institucionais como uma preparação de um *roadmap* brasileiro de hidrogênio verde. Além disso, é apresentada uma visão geral sobre as principais tecnologias de aplicação de hidrogênio verde e PtX e o seu estado de maturidade no Brasil em comparação aos países líderes nessas tecnologias, de forma a avaliar os potenciais para o desenvolvimento econômico sustentável a partir da descarbonização de setores da economia nacional por meio das tecnologias de hidrogênio verde.

Para tanto, o presente estudo foi elaborado com a seguinte estruturação: O Primeiro Capítulo visa fornecer informações básicas sobre o hidrogênio, apresentando

suas características físico-químicas, tecnologias vinculadas e atuais denominações em sistema de cores de acordo com a fonte de energia geradora (cinza, azul e verde). O capítulo também aborda as principais aplicações na atualidade do hidrogênio, ainda majoritariamente de origem fóssil, como insumo industrial na síntese de produtos e avalia as principais aplicações potenciais de hidrogênio verde como um vetor energético nos mais diversos setores da economia e segmentos industriais. Da mesma forma, são apresentadas as principais tecnologias para a distribuição do gás e perspectivas de redução de custos de produção e distribuição do hidrogênio verde.

A partir das informações transmitidas na introdução, o Segundo Capítulo apresenta o atual cenário de hidrogênio verde no mundo. O capítulo é iniciado com uma contextualização sobre as principais ações e estratégias de diversos países no desenvolvimento de economias de hidrogênio. Nesse sentido, apresenta-se um compilado comparativo sobre as estratégias e *roadmaps* bem como sobre as quantidades e volumes de investimentos em projetos em hidrogênio e tecnologias correlatas no mundo. O capítulo se encerra com a apresentação de estudos de casos da União Europeia e mais 10 países, a fim de apresentar as perspectivas de utilização dessa tecnologia para a descarbonização bem como para o desenvolvimento sustentável das economias globais.

O Terceiro Capítulo é integralmente dedicado a fornecer um panorama sobre o setor de hidrogênio no Brasil e suas potencialidades. Nesse sentido, são apresentados os principais atores na produção e consumo do gás, volumes de produção e consumo bem como aplicações atuais do hidrogênio no país. Na sequência são sintetizadas as principais políticas públicas e ações no campo da pesquisa, desenvolvimento e demonstração já realizadas no país a fim de possibilitar o desenvolvimento das rotas tecnológicas de hidrogênio como vetor energético e aprimoramento da cadeia de produção. Tratando-se especificamente de hidrogênio verde, são apresentados alguns exemplos de projetos com distintas aplicações (transportes, indústria, armazenamento, P, D&I) bem como uma extensa análise sobre os potenciais de produção a partir de fontes alternativas de energia para consumo interno e exportação. Nesse sentido, realiza-se uma análise da capacidade instalada e potenciais de expansão da geração de tais fontes, considerando a diversidade e

distribuição das mesmas no país. Para exemplificar o potencial para o hidrogênio verde no país é apresentado um estudo de caso sobre a indústria de fertilizantes nitrogenados com possível utilização da amônia verde. Por fim, o capítulo apresenta o mapeamento da indústria e dos principais atores acadêmicos e institucionais na temática de hidrogênio no Brasil.

Com foco no hidrogênio verde, o Quarto Capítulo apresenta os resultados de uma pesquisa de opinião ampla realizada com mais de 100 empresas e instituições atuantes diretamente e indiretamente na cadeia de valor hidrogênio. Tal capítulo reúne informações e percepções extremamente relevantes sobre a composição da cadeia produtiva no Brasil, bem como sobre as vantagens, desafios e recomendações para o desenvolvimento de uma economia de hidrogênio no país, os quais serão detalhados no seguinte capítulo do estudo.

O Quinto Capítulo consolida, por meio de uma análise SWOT, a vasta quantidade de informações e percepções reunidas por meio de entrevistas, pesquisa com *stakeholders* e bibliografia consultada para a realização do presente estudo, apresentando os principais pontos fortes e pontos de atenção endógenos e exógenos no desenvolvimento de um mercado nacional e de exportação de hidrogênio verde brasileiro. O capítulo é encerrado com uma síntese sobre os principais desafios e recomendações com base na literatura e nos exemplos de outras "*hydrogen societies*" para o desenvolvimento de uma economia de hidrogênio no país.

Metodologia

De forma geral, pode-se afirmar que o propósito do trabalho é descritivo, apresentando uma visão geral sobre as principais tecnologias de aplicação de hidrogênio verde e PtX e o seu estado de maturidade no Brasil em comparação aos países líderes nestas tecnologias, bem como conduzindo um mapeamento da indústria e dos principais atores acadêmicos e institucionais como uma preparação de um *roadmap* brasileiro de hidrogênio verde.

Nesse sentido, utilizou-se uma abordagem técnica quantitativa e qualitativa com levantamento de literatura bibliográfica e entrevistas, fazendo uso de tabelas e gráficos demonstrativos para resumir os dados e opiniões organizados. A seguir será descrita a metodologia utilizada especificamente para cada capítulo do presente estudo.

Para os Capítulos Primeiro e Segundo (“Sobre o Hidrogênio” e “Hidrogênio Verde no Mundo”, respectivamente) realizou-se uma ampla pesquisa bibliográfica para verificação das tecnologias para o hidrogênio, principais projetos, volumes de investimento e tendências nesse setor. Nesse sentido, as principais fontes consultadas foram as publicações das instituições *Hydrogen Council* e IEA (Agência Internacional de Energia), assim como dos países que possuem estratégias nacionais e *roadmaps* para o hidrogênio em vigor.

No Terceiro Capítulo foram adotadas diversas técnicas para levantamento das informações, conforme descrito a seguir. No que concerne a utilização do hidrogênio como insumo para síntese de produtos e processos industriais, foram consideradas duas fontes principais de informações para apuração dos volumes totais de produção e consumo de hidrogênio no Brasil. Primeiramente consultou-se os dados para o referido gás na Pesquisa Industrial Anual – Produto (PIA-Produto)¹ disponibilizadas pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) para os anos de 2015, 2016, 2017 e 2018 (ano mais recente disponível até o momento de elaboração do presente estudo). Como fonte adicional de informação, realizou-se também uma consulta ao Centro de Pesquisas e Desenvolvimento Leopoldo A. Migucz de Mello (CENPES) da Petróleo Brasileiro S.A. (Petrobras)².

Devido à ao elevado grau de concorrência do mercado, observou-se uma escassez de informações públicas sobre geração e consumo de hidrogênio no Brasil. De forma a obter informações adicionais sobre a demanda de hidrogênio nacional, foram realizadas entrevistas com

representantes das quatro maiores empresas fornecedoras de gases industriais no país. Para tanto, foi elaborado um roteiro-base para as conversas contendo perguntas sobre a configuração atual do mercado de hidrogênio brasileiro (produtores e consumidores), tecnologias de produção e perspectivas para o desenvolvimento de um mercado de hidrogênio verde no Brasil. As informações de maior recorrência apreendidas de tais entrevistas são apresentadas no Item 3.1. É importante ressaltar que durante as conversas não foram reveladas informações sobre a quantidade exata de unidades de instalações com produção de hidrogênio de tais fornecedores. O roteiro de perguntas está disponível no Anexo III do presente estudo.

De modo a realizar o levantamento sobre políticas públicas, pesquisa e desenvolvimento, projetos nacionais e potencial para a produção de hidrogênio verde no Brasil foram consultadas associações setoriais, empresas públicas e privadas com sede no Brasil, bem como uma extensa bibliografia elaborada principalmente pela EPE (Empresa de Pesquisa Energética) / MME (Ministério de Minas e Energia) e MCTI (Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações).

Para a realização do mapeamento da indústria e dos principais atores acadêmicos e institucionais como uma preparação de um *roadmap* brasileiro de hidrogênio verde, foram identificadas empresas e instituições que atuam de forma direta ou indireta na cadeia de produção de hidrogênio no Brasil, tais como produtores, fornecedores de tecnologia, prestadores de serviço e consumidores. Adicionalmente foram analisados potenciais consumidores de hidrogênio verde no país, os quais a partir do crescente comprometimento socioambiental (Agenda ESG, na sigla original em inglês de adesão a melhores práticas ambientais, sociais e de governança e aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável³) poderão buscar alternativas para substituir seus insumos de produção de origem fóssil por renovável, como o hidrogênio verde e as tecnologias PtX.

¹ Conforme informado pelo IBGE Investiga informações referentes aos bens e serviços produzidos pela indústria nacional, tendo como unidade de investigação a unidade local produtiva industrial das empresas industriais formalmente constituídas.

² Processo No 48360.000218/2020-53 – Ofício CENPES 0007/2020.

³ <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>. Acesso em 04.01.2021.

Foi também parcialmente considerada a análise de potenciais consumidores empresas multinacionais instaladas no Brasil, as quais devem seguir as políticas de sustentabilidade das suas matrizes nos setores de energia, mineração, alimentos, siderurgia, fertilizantes e cimento.

A pesquisa com os principais dos stakeholders da cadeia produtiva de hidrogênio no Brasil foi realizada por meio de um questionário online, o qual foi amplamente divulgado em diversos canais para obtenção um retorno amplo e representativo. O Item 4.1 do Quarto Capítulo apresentada de forma detalhada a metodologia utilizada para a realização dessa pesquisa.

Por fim, para a realização das recomendações no Quinto Capítulo desenvolveu-se uma análise SWOT (*Strengths Weaknesses Opportunities Threats*; Forças, Oportunidades, Fraquezas e Ameaças em português) para sintetizar os principais pontos fortes e pontos de atenção no desenvolvimento de um mercado nacional e de exportação de hidrogênio verde brasileiro. Para a conclusão deste capítulo foram reafirmadas as recomendações realizadas em publicações distintas pelas instituições *Hydrogen Council* e IEA, bem como resumidas as recomendações originadas a partir do levantamento bibliográfico e entrevistas com especialistas e a cadeia produtiva de hidrogênio para o desenvolvimento do presente estudo.

1. Sobre o hidrogênio

O presente capítulo fornece informações básicas sobre o hidrogênio, apresentando suas características físico-químicas, tecnologias vinculadas, e atuais denominações em sistema de cores de acordo com a fonte de energia geradora (cinza, azul e verde). O capítulo também aborda as principais aplicações do hidrogênio na atualidade e avalia as principais aplicações potenciais de hidrogênio verde como um vetor energético nos mais diversos setores da economia e segmentos industriais. Da mesma forma, são apresentadas as principais tecnologias para a distribuição do gás e perspectivas de redução de custos de produção e distribuição do hidrogênio verde.

1.1 Características

O hidrogênio 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 hidrogênio, é 14,4 vezes mais leve que o ar.

O gás hidrogênio é ao mesmo tempo um vetor energético, como a eletricidade, e um combustível primário, a exemplo dos combustíveis fósseis. No que tange a característica do hidrogênio como um combustível primário, o mesmo pode ser encontrado em determinados ambientes geológicos em sua forma pura ou misturada com outros gases. O Brasil possui reservas de hidrogênio natural conhecidas até agora em pelo menos quatro estados, porém ainda não exploradas: Ceará, Roraima, Tocantins e Minas Geras. Enquanto em outros países como Mali estas fontes já estão sendo exploradas há anos, o potencial econômico do hidrogênio natural como combustível primário no Brasil ainda não está definido e depende de pesquisas futuras. O presente estudo possui enfoque nas aplicações tecnológicas do gás já existentes e na utilização do hidrogênio como um vetor energético⁴.

No que tange a característica do gás hidrogênio como um vetor energético, o seu papel e potencial possui semelhanças com o da eletricidade. Tanto o hidrogênio quanto a eletricidade podem ser produzidos a partir de diversas fontes de energia e tecnologias. Ambos são versáteis e podem ser utilizados em diversas aplicações livres de emissões de gases de efeito estufa (GEE), partículas, óxidos de enxofre ou outros poluentes.

A diferença crucial entre hidrogênio e a eletricidade é que o hidrogênio 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.

Neste sentido o hidrogênio pode apresentar uma grande vantagem para o sistema elétrico nacional e contribuir para o balanceamento da demanda (consumo) e a oferta (geração) energética (CASTRO et al., 2021). Atualmente, tal balanceamento 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 intermitência⁵ na capacidade de geração de acordo com a disponibilidade temporária de tais fontes.

Alternativamente, a partir da utilização do hidrogênio, o excedente da geração de um volume de energia superior à demanda atual pode ser redirecionado para eletrolisadores capazes de produzir hidrogênio. Em momentos inversos, quando a demanda energética supera a capacidade da geração, o hidrogênio pode ser empregado para geração de energia elétrica por meio de pilha a combustível⁶, suprimindo a diferença, com pouca perda de energia.

Devido à sua baixa densidade e aos baixos pontos de ebulição e fusão, o manejo do hidrogênio é bastante desafiador. Sob condições normais de temperatura e pressão (CNTP) o hidrogênio é gasoso e inodoro, além de ter grande potencial de difusão e efusão.

⁴ Miranda, P. E. V., Editor, "Science and Engineering of Hydrogen-Based Energy Technologies", 1st Edition, ELSEVIER, Academic Press, 438 p, 2019.

⁵ De acordo com a Resolução ANEEL n. 493/2012 define-se fonte de energia intermitente como "Recurso energético renovável que, para fins de conversão em energia elétrica pelo sistema de geração, não pode ser armazenado em sua forma original".

⁶ De acordo com a Especificação Técnica ABNT IEC/TS 62282-1, "os dispositivos capazes de converter energia química em elétrica por meio de uma reação eletroquímica podem ser denominados, igualmente, como pilhas a combustível ou células a combustível". Para a especificação da norma técnica a ABNT utilizou o termo "pilha a combustível", termo que será igualmente empregado no presente estudo sem qualquer prejuízo ao termo "célula a combustível".

O transporte acontece geralmente de forma gasosa sob alta pressão de 500 ou 700 bar ou de forma liquefeita por meio de redução de temperatura a $-252\text{ }^{\circ}\text{C}$ (graus Celsius negativos), refletindo em um processo muito complexo e de elevados custos financeiros.

Entretanto, o hidrogênio possui um elevado potencial energético. Em comparação com o diesel, por exemplo, esse potencial pode ser três vezes maior, considerando que 1 kg de hidrogênio possui cerca de 3 vezes o conteúdo energético de 1 litro de óleo diesel. Isso porque o poder calorífico inferior do hidrogênio é igual a 33,29 kWh/kg e 1 L de diesel contém 10,24 kWh, já que o seu poder calorífico é igual a 12,0 kWh/kg e a sua densidade (nas CNTP) é igual a 0,853 kg/L.

Por fim, a característica peculiar de ser um gás combustível com ausência de átomos de carbono torna a aplicação do gás hidrogênio muito interessante na discussão sobre a redução de emissão dos GEE.

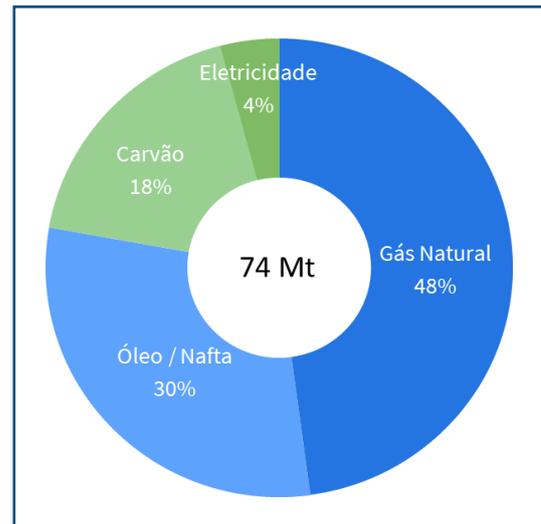


Figura 1 – Fontes de geração de hidrogênio no mundo. Fonte: IEA (2019a). Elaboração própria.

1.2 Classificação e Produção

A utilização de hidrogênio vem crescendo significativamente nos últimos 30 anos, sendo que em 2018 a produção mundial de hidrogênio foi equivalente a 74 milhões de toneladas (t), três vezes maior do que em 1975. Conforme apresentando na Figura 1, mais de 95% das fontes para a geração são de origem fóssil. A produção global de hidrogênio utiliza 6% do gás natural e 2% do carvão, sendo responsável por uma emissão de 830 milhões de toneladas de dióxido de carbono (CO_2) por ano, o que representa a emissão da Inglaterra e Indonésia juntas (IEA, 2019a).

Até o momento, não pôde ser verificada uma taxonomia normatizada e mundialmente reconhecida quanto à identificação em cores das rotas tecnológicas de produção de hidrogênio. Ainda assim, o uso de cores para identificação do hidrogênio é amplamente utilizado nos meios científico e industrial, motivo pelo qual as principais formas de identificação e categorização do gás serão descritas a seguir.

Ainda com grande predominância mundial (cerca de 95%), o hidrogênio gerado através de reforma a vapor de metano é denominado de **hidrogênio cinza**. A produção de uma tonelada de hidrogênio gera cerca de 10t de CO_2 (IEA, 2020). Além disso, durante a “pré-cadeia”, ou seja, durante as atividades de extração e transporte do elemento, são constatados volumes significativos de emissões de CO_2 adicionais que devem ser considerados para o cálculo de emissões total.

Por outro lado, se o CO_2 emitido durante a geração de hidrogênio for capturado e armazenado (*Carbon Capture and Storage, CCS*) ou capturado e utilizado em outros processos industriais (*Carbon capture and Utilization, CCU*) ou ainda CCUS (*Carbon Capture, Utilization and Storage, CCUS*)⁷ o hidrogênio é chamado de **hidrogênio azul**. A produção de hidrogênio azul é considerada neutra de emissões de carbono pois o CO_2 produzido durante a produção não é emitido na atmosfera. Porém, este processo não soluciona o problema de emissões significativas de GEE na pré-cadeia supracitada. Dessa forma, o hidrogênio azul é frequentemente apresentado como uma solução de descarbonização transitória do hidrogênio cinza ao hidrogênio verde.

O hidrogênio cuja produção é livre de emissão de CO_2 é denominado **hidrogênio verde**. 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 hidrogênio sustentável e livre de emissões CO_2 , independentemente da tecnologia de eletrólise escolhida. Alternativamente o hidrogênio verde também pode ser produzido através do emprego da biomassa como matéria prima. Dessa forma, o hidrogênio verde é considerado na atualidade uma das principais tecnologias-chave para economias comprometidas com as metas de descarbonização assinadas no “Tratado no âmbito da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima (UNFCCC)”, popularmente conhecido como Acordo de Paris.

⁷ <https://www.lse.ac.uk/granthaminstitute/explainers/what-is-carbon-capture-and-storage-and-what-role-can-it-play-in-tackling-climate-change/>. Acesso em 19.02.2021.

1.3 Distribuição

Atualmente a produção de hidrogênio mundial é majoritariamente de origem fóssil com concentração de produção em plantas estacionárias. Apenas 5% do volume de hidrogênio produzido mundialmente é de fato comercializado, portanto o transporte do gás ainda é pouco expressivo.

O escoamento da produção de hidrogênio pode se dar tanto por rotas de distribuição locais como internacionais. Em casos de disponibilidade e viabilidade de exploração de fontes renováveis ou gás natural (com locais para armazenamento do carbono capturado) para a produção de hidrogênio, a demanda de consumidores de grande porte (indústria), assim como de pequeno e médio porte (a exemplo de postos de reabastecimento ou residências) pode ser suprida pela produção local de hidrogênio (*onsite*) ou ainda regional (também denominada pela literatura como semi-centralizada).

No entanto, diversas restrições, de forma isolada ou somadas, podem resultar em uma produção de hidrogênio insuficiente e, portanto, incompatível com a demanda de tais consumidores, abrindo oportunidade para rotas de distribuição internacionais. Como principais restrições para a produção de hidrogênio de forma local e regional podemos citar a indisponibilidade de fontes renováveis para a produção de hidrogênio verde, seja pela escassez de tais fontes ou utilização integral da capacidade instalada para a geração de eletricidade, a inexistência de infraestrutura adequada para o armazenamento e distribuição do hidrogênio ou a ainda indisponibilidade de áreas e restrições ambientais, entre outros fatores. Estima-se que muitos dos países e regiões com uma elevada demanda futura por hidrogênio, tais como União Europeia, Coreia do Sul, Japão enfrentam os desafios supracitados, havendo a necessidade do desenvolvimento de rotas internacionais de distribuição do hidrogênio (HYDROGEN COUNCIL, 2021, p.18). Assim, espera-se um elevado crescimento na demanda por importação de hidrogênio a partir de 2030, com curva de crescimento acentuada pelo menos até 2050.

Até o momento não pôde ser verificado uma variedade de fontes de informação sobre volumes de importação de hidrogênio estimados para as próximas décadas. Não obstante, o instituto alemão FRAUNHOFER ISE (2019) avaliou a demanda potencial de importação de hidrogênio na Alemanha e na União Europeia nos anos de 2030 e 2050 a partir de dois cenários.

Tabela 1 – Cenários de demanda de importação de H₂ – Alemanha e União Europeia. Fonte: Fraunhofer ISE, 2019. Elaboração própria.

Parâmetro	Região	2030		2050	
		Cenário A	Cenário B	Cenário A	Cenário B
Demanda por H ₂ (TWh)	Alemanha	4	20	250	800
	União Europeia	30	140	800	2250

O primeiro cenário (Cenário “A”) considera uma baixa eletrificação da economia, apresentando-se como um cenário conservador. O segundo cenário (Cenário “B”), adotado pelo referido instituto, considera a eletrificação de diversos setores da economia com neutralidade climática⁸, a partir de fontes e vetores de energia sustentáveis tais como o hidrogênio e o metano sintético. A Tabela 1 apresenta a demanda para tais cenários para as duas regiões, em TWh.

Recentemente, o Ministério Federal Alemão de Educação e Pesquisa (BMBF, na sigla em alemão) (2020) declarou ainda existirem incertezas quanto à demanda de hidrogênio na Alemanha em 2050, citando um novo levantamento realizado pelo Instituto Max-Planck para a Conversão Química de Energia (*Max-Planck-Institut für Chemische Energiekonversion*), o qual apresenta volumes de importação ainda mais elevados dos que os apresentados na Tabela 1 acima. De acordo com o instituto, a Alemanha precisará importar em 2050 45 milhões de toneladas de hidrogênio verde, equivalente a 2.250 TWh. A seguir, será necessário verificar quais são as tecnologias mais promissoras para a distribuição do hidrogênio, tanto em âmbito regional como intercontinental.

Em regiões com a existência de gasodutos, é possível transportar o hidrogênio em sua forma gasosa comprimida a 350 ou 700 bar (70 MPa). Alternativamente, o hidrogênio pode ser liquefeito (LH2) por meio de redução de temperatura a -252 °C (graus Celsius negativos), convertido em amônia (NH₃), ou ainda transportado via tecnologias *Liquid Organic Hydrogen Carrier* (LOHC). Os LOHC são compostos orgânicos insaturados capazes de armazenar grandes quantidades de hidrogênio por meio de um processo baseado em hidrogenação e desidrogenação. Ressalta-se que o LOHC é líquido em condições normais de temperatura e pressão, apresentando similaridade ao diesel e à gasolina, sendo seus processos de manuseio e armazenamento, portanto, conhecidos pela indústria⁹.

⁸ Trata-se de uma mudança em toda a economia, eliminando combustíveis fósseis e outras fontes de emissões de CO₂ onde for possível nos setores de transporte, geração de energia e na indústria. Para o resto, a cada tonelada de CO₂ emitida, uma tonelada deve ser compensada com medidas de proteção climática, com o plantio de árvores, por exemplo. <https://www.dw.com/pt-br/o-que-%C3%A9-neutralidade-clim%C3%A1tica/a-48995528>. Acesso em 08.01.2021.

⁹ Para mais informações consulte <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2019/ee/c8ee02700e#!divAbstract>. Acesso em 03.03.2021.

Uma breve análise comparativa entre as tecnologias alternativas para distribuição do hidrogênio será apresentada a seguir.

Conforme informado pelo *Hydrogen Council* (2021)¹⁰, para a escolha da tecnologia para distribuição do hidrogênio devem ser considerados fatores como a finalidade do uso do hidrogênio, os critérios de pureza e necessidade de armazenamento de longo prazo. Nesse sentido, o transporte de hidrogênio liquefeito (LH₂) apresenta maior pureza e facilidades para a distribuição posterior do produto via modal rodoviário, como para casos de estações de reabastecimento de veículos movidos a pilha a combustível de hidrogênio. Por outro lado, o LH₂ apresenta baixa densidade de energia volumétrica quando comparado com o hidrogênio convertido em amônia (NH₃) e elevadas perdas diárias no armazenamento. Já a amônia (NH₃) apresenta vantagens comparativas ao LOHC e ao LH₂ quando considerada a ausência de necessidade de reconversão do NH₃ para o hidrogênio (H₂) tanto na aplicação do composto na indústria fertilizantes, como combustível marítimo ou ainda na combustão para geração de energia. No entanto, os níveis de pureza da NH₃ são inferiores ao LH₂ e devido ao seu grau de toxicidade, seu armazenamento em áreas residenciais é restrito. Por fim, o LOHC pode fazer uso da infraestrutura de diesel já disponível e armazenar hidrogênio por longos períodos sem perdas consideráveis, ao contrário do LH₂. No entanto, o processo de desidrogenação do LOHC demanda elevadas quantidades de calor.

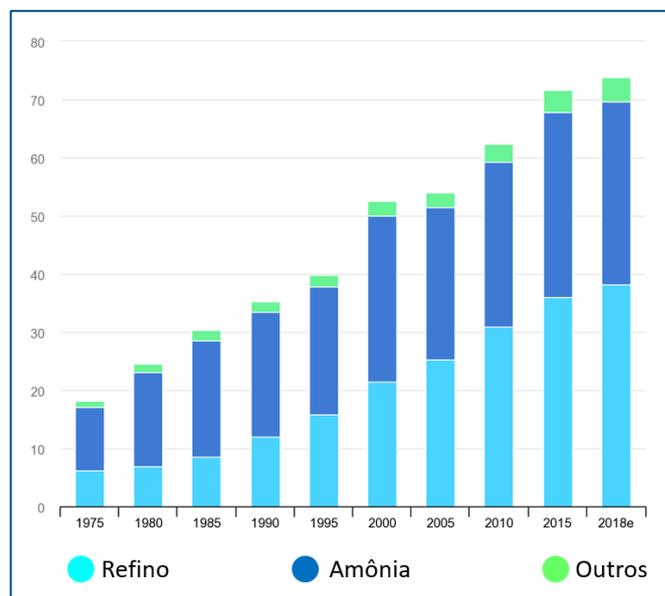


Figura 2 – Consumo de H₂ no mundo. Fonte: IEA (2019a). Elaboração própria.

1.4 Consumo

Atualmente, o hidrogênio é utilizado na síntese de diversos produtos e em processos industriais diversos. Conforme demonstrado na Figura 2, desde o ano de 1975 a demanda global por hidrogênio mais que triplicou em comparação a meados de 1970, superando a marca dos 70 Mt em 2018. A maior contribuição para o crescimento da demanda constatada se deve à atividade de refino de óleo combustível além da crescente demanda global por fertilizantes que empregam a amônia como o principal insumo.

Em seguida serão apresentadas as principais aplicações não energéticas de hidrogênio.

1.4.1 Refino de óleo bruto

Na atualidade, o refino de óleo bruto é responsável por 33% do consumo total de hidrogênio no mundo (IEA, 2019b). Esse hidrogênio é produzido e consumido integralmente pelas próprias refinarias.

O hidrotratamento e hidrocrackeamento são os principais processos de consumo de hidrogênio no processo de refino de óleo bruto para produzir óleo combustível. O hidrotratamento, também denominado hidrodessulfurização (HDS), é empregado para remover impurezas, em especial o enxofre, sendo responsável por uma grande parte do uso de hidrogênio nas refinarias. Por meio deste processo as refinarias removem hoje cerca de 70% do enxofre naturalmente incorrido de petróleo bruto.

¹⁰ O Hydrogen Council foi criado em 17 de janeiro de 2017 em Davos na Suíça, na presença de CEOs e executivos da indústria dos Estados Unidos, Ásia e Europa, com objetivo de apoiar e alavancar o papel do hidrogênio na transformação energética mundial. O grupo inicial era composto por 13 parceiros dos setores industrial e de energia e hoje são mais de 100 empresas participantes. Estima-se que cerca de 90% das empresas participantes no Hydrogen Council possuem subsidiárias no Brasil.

Com as preocupações sobre a qualidade do ar, constata-se uma crescente pressão para redução paulatina no teor de enxofre nos produtos finais. Juntamente do crescimento contínuo da demanda por estes produtos finais em geral, o incremento do processo de hidrotreamento contribuiu para um crescimento significativo no consumo de hidrogênio.

Já o processo de hidrocraqueamento utiliza hidrogênio para beneficiar óleos pesados residuais em produtos petrolíferos de maior valor comercial. Como a demanda por estes produtos é crescente, o consumo de hidrogênio para hidrocraqueamento também apresentou um significativo crescimento nos últimos anos.

1.4.2 Produção de amônia

Atualmente, mais de 180 milhões de toneladas de amônia (NH_3) já são produzidas anualmente para diversos usos, incluindo fertilizantes agrícolas, refrigeração, produtos farmacêuticos, têxteis e explosivos. Para esse processo é utilizado o gás natural ou carvão mineral para a obtenção de hidrogênio, que será combinado com nitrogênio a partir da síntese do amoníaco (Síntese de Harber-Bosch) para obtenção da NH_3 . Esse processo é altamente poluente, correspondendo a 1,8% das emissões globais anuais (Siemens Energy, 2021). Conforme evidenciado na Figura 2, o aumento do consumo de hidrogênio no mundo nos últimos 30 anos é diretamente ligado ao aumento da produção de amônia, principalmente para fabricação de fertilizantes nitrogenados.

1.4.3 Agentes redutores

O oxigênio, por sua notória característica de se associar a outros elementos com grande facilidade, é empregado na indústria siderúrgica e de vidros para criar ambientes de redução em fornos de têmpera. O hidrogênio reage com óxidos de metal e retira o oxigênio das ligas de metal para obter aços especiais e mais puros. A mesma reação química é utilizada produção de vidros planos onde o hidrogênio capta os átomos de oxigênio para evitar falhas e inclusões no vidro produzido.

1.4.4 Hidrogenação de hidrocarbonetos

Através de diversas reações químicas, o carvão mineral juntamente do hidrogênio é convertido em hidrocarbonetos líquidos. Desta forma podem ser produzidos combustíveis sintéticos tais como gasolina, diesel e óleo combustível. Este processo atualmente apresenta baixa significância, principalmente pela alta emissão de GEE. No entanto, a possibilidade de substituição do carvão como fonte de carbono por biomassa poderá trazer futuramente novas oportunidades econômicas para o Brasil, o qual apresenta uma vasta experiência no emprego de biomassa para fins energéticos.

1.4.5 Hidrogenação de gordura

A gordura endurecida é frequentemente obtida a partir de óleo vegetal por meio do processo de hidrogenação. O hidrogênio é usado para saturar as moléculas de gordura o que resulta em um ponto de fusão mais elevado, tornando o produto mais sólido. Uma aplicação clássica do processo de hidrogenação consiste na produção de margarina hidrogenada na indústria de alimentos.

1.4.6 Refrigeração e criogenia

Devido a sua elevada capacidade calorífica e condutividade de calor, o hidrogênio é usado como um meio refrigerador em usinas e plantas industriais nas quais o resfriamento líquido pode ser problemático ou ainda onde o gás não deve circular ou deve circular apenas lentamente. Uma aplicação bastante comum é na refrigeração de turbinas de termoeletricas.

O hidrogênio líquido também é adequado para o processo criogênico, ou seja, funciona como um meio refrigerador para temperaturas extremamente baixas (abaixo de $-150\text{ }^\circ\text{C}$). Existem diversas aplicações para a criogenia, dentre as quais podem ser citadas a indústria de equipamentos médicos, gases liquefeitos, aeronaves e equipamentos de uso aeroespacial¹¹.

¹¹ <https://sites.ifi.unicamp.br/labvacrio/criogenia/>. Acesso em 08.04.2021.

1.5 Potenciais aplicações de hidrogênio verde

A substituição do hidrogênio cinza por hidrogênio verde como insumo dos processos industriais descritos no Item 1.4 apresenta-se como uma das soluções de maior significância e impacto para a redução das emissões dos GEE. Da mesma forma, outra forma relevante de descarbonização da economia consiste na adoção de energia a partir de fontes renováveis, não apenas pela indústria, mas por todos os setores da economia. Como as fontes de energia renováveis tais como solar, eólica e biomassa são geradoras de eletricidade, o hidrogênio 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) e será detalhado a seguir.

De acordo com o organismo de certificação e inspeção alemão TÜV SÜD (2021), "*Power-to-X* 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. PtX pode ser usado para produzir hidrogênio 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 (tradução nossa)".

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 3 ilustra como a integração de diferentes setores da economia (também denominado "acoplamento de setores"¹²) pode ser realizado usando energia elétrica renovável como fonte de energia e hidrogênio como o vetor para diferentes aplicações.

A Tabela 2 apresenta de forma resumida as principais tecnologias PtX, bem como sua relevância e exemplos de projetos em desenvolvimento.

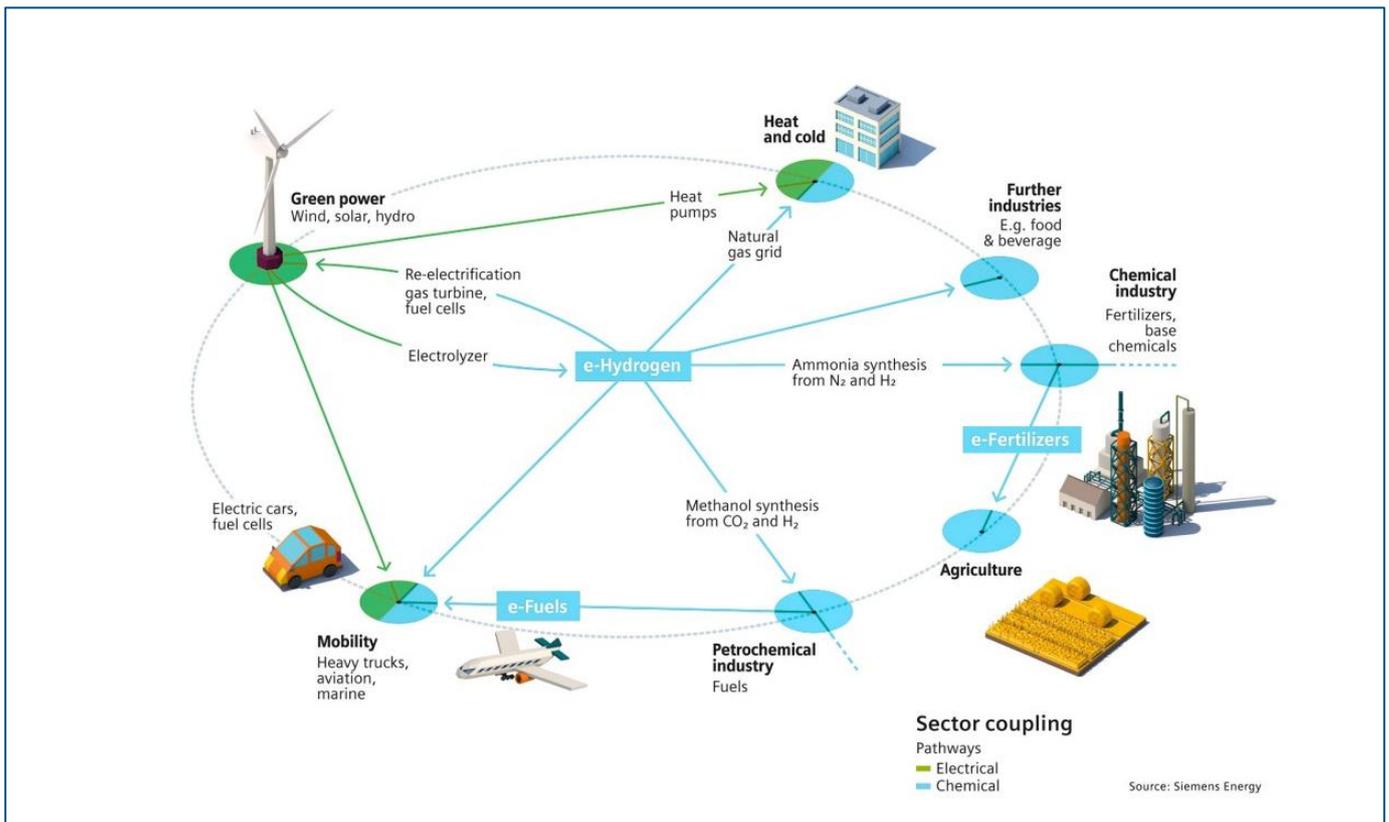


Figura 3 – H₂ verde e processos *Power-to-X*. Fonte: Siemens (2020).

¹² O acoplamento de setores consiste em uma maior integração do uso final de energia e abastecimento setores de forma integrada, melhorando a eficiência e a flexibilidade do sistema de energia, bem como sua confiabilidade e adequação. Além disso, o acoplamento de setores pode reduzir os custos de descarbonização. Mais informações podem ser acessadas em [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2018/626091/IPOL_STU\(2018\)626091_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2018/626091/IPOL_STU(2018)626091_EN.pdf). Acesso em 15.01.2021.

Tabela 2 – Resumo das principais tecnologias PtX. Fonte: Elaboração própria.

Tecnologia e definição	Relevância	Projetos
<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>Projeto Hyflexpower: consórcio formado pela Engie Solutions, Siemens Gas and Power, o Centro Aeroespacial Alemão (DRL, sigla no original) e quatro universidades europeias em uma unidade industrial de papel e celulose na França para produção de H₂ verde e mistura ao gás natural atualmente utilizado em usinas de cogeração de 12 MWe.</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.</p> <p>- Metano sintético: utilização do CO₂ para a reação¹³.</p> <p>- Injeção de H₂ verde na rede de gás natural (atualmente limitado a 20%): redução da utilização do gás natural de fonte fóssil.</p>	<p>Diversos projetos demonstrativos e um comercial em desenvolvimento.</p> <p>Projeto <i>Hybridge</i>: construção na Alemanha de um sistema de eletrólise diretamente conectado ao parque eólico de Harthäuser, sendo capaz de converter até 100 MW de energia elétrica em hidrogênio a partir de 2023¹⁴.</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.</p> <p>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>Comercialização de carros movidos puramente com baterias a exemplo dos comercializados pela montadora Tesla ou movidos a pilhas a combustível a hidrogênio como o veículo Toyota Mirai. Especialistas defendem que as duas tecnologias deverão coexistir, ambas se apresentando como soluções concretas para a substituição dos motores a combustão interna em médio e longo prazo.</p>
<p>Power-to-Fuel</p> <p>Hidrogênio verde para a produção de combustíveis líquidos sintéticos (<i>e-fuel</i>). O hidrogênio em conjunto de CO₂ passa por uma série de processos envolvidos na produção do chamado óleo sintético (<i>syn crude</i>) e posterior refino em combustíveis como diesel sintético, gasolina sintética ou ainda querosene de aviação sintético (<i>jet fuel</i>).</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>Novos biocombustíveis como o óleo vegetal hydrogenado (HVO) apresentam um mercado promissor em função das tecnologias de hidrogenação de bio-óleos disponíveis. No Brasil, tais tecnologias encontram-se em fase de testes e demonstração em campo.</p>	<p>Diversos projetos em andamento no mundo.</p> <p>Projeto alemão ProQR: prevê a partir de 2022 o fornecimento de <i>e-fuel</i> para aeroportos e pistas de pouso em regiões afastadas dos grandes centros urbanos, como a região amazônica brasileira¹⁵.</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>	<p>Projeto Neom: em desenvolvimento na Arábia Saudita, com a previsão produção de 650 toneladas de hidrogênio/dia, possui como produto final, a E-amônia (amônia verde), para distribuição para outras regiões do globo¹⁶.</p>

¹³ <https://www.powertogas.info/projektkarte/audi-e-gas-projekt/>. Acesso em 27 de agosto de 2020.

¹⁴ Outros projetos de tecnologia *Power-to-Gas* podem ser consultados em <https://www.powertogas.info/projektkarte/>

¹⁵ Mais informações sobre o projeto podem ser consultadas em <https://ptx-hub.org/proqr/>. Acesso em 08.04.2021.

¹⁶ O projeto será descrito detalhadamente no Item 2.10 do presente estudo. Da mesma forma, os potenciais da E-amônia para o Brasil serão apresentados no Item 3.5.1.

A partir da introdução do *Power-to-X* e exposição de alguns projetos de referência, será apresentado a seguir informações relacionadas ao potencial de aplicação de tais rotas tecnológicas em segmentos da indústria e demais setores da economia, de modo a verificar o potencial de demanda futura para o hidrogênio verde no Brasil. Portanto, além do setor elétrico, o qual pode beneficiar-se com a reconversão do hidrogênio armazenado em energia elétrica, foram selecionados seis setores que apresentam elevado potencial de substituição de insumos primários por hidrogênio verde.

1.5.1 Indústria do cimento

A indústria de cimento internacional configura como uma das indústrias mais poluentes, sendo responsável por 7% das emissões totais de CO₂ geradas pela atividade humana no mundo (DW, 2020). Dados da Agência Internacional de Energia (IEA) (2021) indicam uma média de crescimento anual na produção de cimento clínquer entre 2014 a 2018 de 1,6% ao ano, corroborando para o aumento nas emissões de CO₂ por essa indústria (IEA, 2020a).

Por outro lado, a indústria de cimento brasileira apresenta um índice de emissão de CO₂ de 2,6%, consideravelmente abaixo dos níveis mundiais. Consta no *"Roadmap Tecnológico do Cimento"*, estudo desenvolvido pelo Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC) e pela Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), o objetivo de redução em até 33% das emissões de CO₂ no setor até 2050. Para isso, a indústria de cimento brasileira tem como meta mais do que dobrar a utilização de combustíveis alternativos em seus processos produtivos. (VISEDIO e PECCHIO, 2019).

Para o continente Europeu, a Associação Europeia de Cimento (Cembureau) reforça o comprometimento de descarbonização dessa indústria em sua recente publicação *"Cementing the European Green Deal"*. No entanto, são apresentados os desafios a serem enfrentados a partir do uso de hidrogênio para a produção de cimento, tais como possíveis impactos nos aspectos físicos do sistema do forno, nos fluxos de massa de combustível, no perfil de temperatura, na transferência de calor, além de considerações de segurança para a planta.

Seguindo essa tendência de ações concretas para descarbonização do setor por meio da utilização de hidrogênio verde nos processos industriais de elevada demanda energética, em julho de 2020, a indústria de cimentos *Lafarge Zementwerke*, juntamente das empresas OMV, Verbund e Borealis assinaram um memorando de entendimento para planejar e construir em uma fábrica de cimento na Áustria uma unidade em grande escala para captura de CO₂ a índices de 0.7Mt/ano e processamento do mesmo com hidrogênio em combustíveis sintéticos, plásticos ou outros produtos químicos.

Por outro lado, o estudo de viabilidade elaborado para o "Projeto Hanson" no Reino Unido conclui que o alto calor de uma chama de hidrogênio em um queimador por si só pode não o tornar adequado para a formação de clínquer. No entanto, o estudo informa sobre a possibilidade de combinar hidrogênio verde com biomassa para superar algumas das "limitações caloríficas" desse combustível alternativo em níveis elevados (GLOBAL CEMENT, 2020). Nesse sentido, um estudo contratado pelo departamento britânico para negócios, energia e estratégia industrial (*Department for Business, Energy and Industrial Strategy*) apontou que a combinação de 70% de biomassa, 20% de hidrogênio verde e 10% de plasma elimina as emissões de CO₂ na indústria de cimentos (HANSON, 2020).

1.5.2 Indústria da mineração

O hidrogênio verde apresenta-se como uma solução concreta para reduzir o consumo de diesel e descarbonizar as operações de mineração, por meio do uso das tecnologias de pilhas a combustível a hidrogênio nas instalações e na logística envolvida, principalmente para veículos pesados. As multinacionais do ramo da mineração Anglo American, BHP, Fortescue, juntamente com a consultoria de engenharia Hatch formaram o consórcio *"Green Hydrogen"* para identificar as formas de utilização do hidrogênio verde para acelerar a descarbonização de suas minas a nível global (H2 VIEW, 2020). O principal objetivo do consórcio consiste em somar esforços para eliminar os obstáculos para a implementação das tecnologias de hidrogênio verde e encorajar suas aplicações em todo setor. Da mesma forma, o consórcio também prevê a criação de um mecanismo para operadores e fornecedores para que os mesmos prestem suas contribuições para a realização dessas atividades.

Conforme apresentado pelo periódico digital *Mining Technology*, os caminhões utilizados no setor de mineração apresentam atualmente elevado consumo de diesel. Da mesma forma, as atividades de manutenção desses veículos são dispendiosas e demandam muito tempo. A título de exemplificação, a substituição de um caminhão de transporte nas minas equivale à retirada de 50 carros de passeio à gasolina das ruas. Além do uso de caminhões movidos à pilha a combustível, outros veículos pesados utilizados nas minas podem utilizar essa tecnologia. A geração de energia elétrica nas próprias minas, através de fontes de energia renovável e produção de hidrogênio verde, também é possível, utilizando-o como combustível nos veículos (*Power-to-Mobility*). Desta forma, as minas seriam autossuficientes energeticamente e evitariam a necessidade de transporte de diesel para regiões isoladas. De acordo com essa tendência de veículos movidos a hidrogênio no setor de mineração, a norueguesa *Nel Hydrogen Electrolyser AS*¹⁷, a empresa de energia renovável Engie e a mineradora Anglo American anunciaram uma

¹⁷ A empresa fornece soluções para produção, armazenamento e distribuição hidrogênio a partir de energia renovável. Mais informações podem ser consultadas em <https://nelhydrogen.com/about/#business>. Acesso em 06.03.2021.

parceria para viabilização de um caminhão de grande porte para a mineração movido a pilha a combustível de hidrogênio de 800 kW de potência. O desenvolvimento do caminhão de 290 toneladas movido a hidrogênio permitirá a otimização das operações logísticas de carga pesada na atividade de mineração, ao mesmo tempo em que reduzirá suas emissões de GEE, fato essencial para a descarbonização de todo o setor (CHOLTEEVA, 2020). O hidrogênio será produzido por um eletrolisador de 3,5 MW alimentado com energia solar produzida em uma usina da Engie. Se o programa for bem-sucedido, a Anglo American converterá todos os seus caminhões na mina e expandirá o programa para suas outras operações de mineração. De acordo com a empresa, uma iniciativa de mineração sustentável promove inovação e produz benefícios em toda a cadeia de valor.

Percebe-se a tendência de descarbonização do setor de mineração em diversas regiões do globo. O relatório *Fuelling the Future of Mobility – Hydrogen and fuel cell solutions for transportation* da consultoria Deloitte descreve a existência de investimentos significativos em veículos de mineração movidos a hidrogênio e acordos financeiros internacionais em novos projetos de tecnologia no Chile e na China representando uma perspectiva positiva para o futuro das pilhas a combustível na mineração. Já a companhia Vale S.A. publicou o objetivo de alcançar autossuficiência energética global com fontes renováveis até 2030. Nesse sentido, um dos 3 pilares dessa iniciativa consiste justamente na transformação da matriz energética da empresa através da substituição de energias fósseis por renováveis bem como por meio da eletrificação de máquinas e equipamentos¹⁸.

1.5.3 Indústria siderúrgica

De acordo com a IEA o setor siderúrgico ocupa o primeiro lugar nas emissões de CO₂ entre as indústrias pesadas no mundo, e o segundo quando no consumo de energia. O setor de ferro e aço responde diretamente por 2,6 Gigatoneladas (Gt) de emissões de CO₂ anualmente, correspondendo a 7% das emissões globais. Nesse sentido, o setor é o maior consumidor industrial de carvão, consumindo cerca de 75% de sua demanda energética (IEA, 2020b). Com metas estabelecidas pela IEA no “*Sustainable Development Scenario*” (Cenário de Desenvolvimento Sustentável)¹⁹ de redução das emissões de 50% até 2050 para o cumprimento das metas globais de descarbonização, a indústria siderúrgica vem se mobilizando para enfrentar os grandes desafios que terá nas próximas décadas por meio de novas tecnologias e aplicações em toda a cadeia produtiva do setor.

Uma das áreas mais proeminentes para o hidrogênio de origem renovável está na utilização no processo de produção do aço. A produção de aço normalmente ocorre em um alto-forno, usando coque feito de carvão por meio de um processo altamente emissor de carbono. O coque desempenha diversas funções no alto-forno, dentre as quais o fornecimento de calor, a sustentação da estrutura da coluna do forno e, principalmente, a atuação como agente redutor, removendo o oxigênio do minério de ferro (separação do ferro (Fe) do minério de ferro (Fe₂O₃)). Além de ser um vetor de energia, o hidrogênio também pode ser considerado um bom agente redutor. No momento, o hidrogênio é usado apenas como uma substituição parcial do carvão ou coque nas operações de aço. Não obstante, a substituição parcial em empreendimentos de grande escala pode resultar em uma substituição significativa dos combustíveis fósseis no processo industrial siderúrgico.

A título de exemplificação, tal indústria emite 500 milhões de toneladas de CO₂ por ano na Alemanha, motivo pelo qual uma vasta maioria das grandes indústrias siderúrgicas estão investindo na descarbonização de suas plantas. Nesse sentido, pode ser citado o projeto da ArcelorMittal em Hamburgo com a empresa Midrex, o qual possui como meta a produção de aço em larga escala através da tecnologia de ferro reduzido direto (DRI) utilizando 100% de hidrogênio como agente redutor. Esse hidrogênio será inicialmente produzido a partir do gás natural (hidrogênio cinza ou azul) e posteriormente a partir de energia eólica instalada na costa no norte da Alemanha de forma permanente (ARCELOR MITTAL, 2020).

1.5.4 Indústria de vidros

A aliança europeia das indústrias de vidros (*Glass Alliance Europe*), composta por 13 associações nacionais e representantes dos cinco principais setores da indústria de vidros, detalhou em seu *Position Paper* (2019) a relevância desse setor na contribuição para a descarbonização das economias a partir da utilização do gás hidrogênio em diferentes etapas do processo de fabricação de vidros. No entanto, a aliança também evidencia os desafios tecnológicos e riscos de perda de competitividade que o setor enfrentará frente a outros atores globais, eventualmente com metas mais brandas de descarbonização (GLASS ALLIANCE EUROPE, 2019).

Dentre os principais desafios estão as melhorias nos sistemas tradicionais de derretimento de vidros por meio de combustíveis fósseis e o cumprimento das legislações de emissão de CO₂, óxidos de nitrogênio (NO_x) e os óxidos de enxofre (SO_x) cada vez mais rígidas.

¹⁸ <http://www.vale.com/esg/en/Pages/Energy.aspx> . Acesso em 29 de agosto de 2020.

¹⁹ Mais informações podem ser consultadas em <https://www.iea.org/reports/world-energy-model/sustainable-development-scenario>. Acesso em 08.04.2021.

Nesse sentido, especialistas apontam para a alternativa tecnológica de realização da eletrólise no local, usando o hidrogênio e o oxigênio de tal processo para a combustão.

Em termos de projetos pioneiros para a descarbonização da indústria de vidros, cumpre informar que a *Nippon Sheet Glass* testará o uso de hidrogênio como combustível alternativo para a produção de vidro em sua instalação *Greengate Works* em St. Helens, no Reino Unido. A partir da realização de diversos testes poderá ser aferido se é possível a substituição do gás natural por hidrogênio. Estima-se que a substituição poderia contribuir para uma redução de até 80% nas emissões de carbono da indústria de vidros (BURGESS, 2020).

1.5.5 Setor residencial

O hidrogênio apresenta-se como uma opção eficiente para a descarbonização do setor de geração de calor e eletricidade em residências e escritórios. Conforme mencionado na Tabela 2 do presente capítulo, em regiões com infraestrutura de gás natural, o hidrogênio pode ser misturado na tubulação de gás natural em até 20% (dependendo do uso final do gás) ou até substituir 100% o gás natural por rotas alternativas de distribuição.

Nesse sentido, o Japão foi o primeiro país a introduzir pequenos geradores de pilha a combustível a hidrogênio para residências desde 2009 com 333.712 unidades comercializadas até o final de 2020, com a finalidade de atingir a meta de 5.300.000 de geradores até 2030. As unidades operam em parceria com a rede elétrica, ligando e desligando em resposta à demanda doméstica de eletricidade e água quente. O resultado geral é uma redução de até 50% nas emissões domésticas de CO₂, além de uma economia no custo de energia elétrica para o consumidor final. A *Osaka Gas*, a qual oferece soluções em pilha a combustível em combinação com energia solar para telhados em novas residências, afirma um desempenho ainda melhor de tais soluções, com reduções de até 57% nas emissões de CO₂ de origem doméstica (IPHE, 2020).

1.5.6 Setor de transportes

As emissões globais do setor de transportes aumentaram menos de 0,5% em 2019 (em comparação com 1,9% anualmente desde 2000) devido a melhoria de eficiência, eletrificação e maior uso de biocombustíveis. No entanto, o transporte ainda é responsável por 24% das emissões diretas de CO₂ da combustão do combustível. A IEA (2020c) atenta para o fato de os veículos rodoviários (carros, caminhões, ônibus e veículos de duas e três rodas) serem responsáveis por 75% das emissões de CO₂ do setor bem como para o crescimento das emissões na aviação e navegação. Não obstante, constata-se um crescimento considerável de estratégias em âmbito nacional e internacional e projetos para substituição de veículos movidos a motores à combustão interna por elétricos. Nesse sentido, a aplicação das tecnologias *Power-to-Mobility* e *Power-to-Fuel* apresentadas na Tabela 2 do presente capítulo confirmam as diversas possibilidades de utilização do hidrogênio como um vetor de descarbonização do setor de transportes.

Um dos principais gargalos para a escalada da utilização do hidrogênio no setor de transportes, apontado tanto na Estratégia Nacional de Hidrogênio (NWS) alemã como também por diversos outros estudos, reside na infraestrutura de abastecimento. Dessa forma, a NWS detalha ações concretas no âmbito da promoção de uma infraestrutura de abastecimento de hidrogênio para abastecer veículos pesados de carga rodoviária, no transporte público e no transporte ferroviário local bem como em todo o continente europeu.

Projetando a necessidade de desenvolvimento de infraestrutura para uma escala de cooperação internacional, o projeto em desenvolvimento *Hydrogen Mobility Europe* (H2ME) prevê a expansão de suas redes de abastecimento de hidrogênio e das frotas de veículos movidos a pilha a combustível que operam nas estradas da Europa, dando início a uma rede pan-europeia de estações de abastecimento de hidrogênio. Desde sua implantação em 2016 até o momento de elaboração do presente estudo, um total de 630 veículos movidos a pilhas a combustível de hidrogênio foram instalados em 10 países e 37 novos postos de reabastecimento de hidrogênio implementados em 8 países, alcançando 14,5 milhões de km rodados e 147 toneladas de hidrogênio distribuídas em 68.000 eventos de reabastecimento.

1.6 Perspectivas de custo de produção e distribuição

O interesse na aplicação do hidrogênio verde como um vetor para a descarbonização de diversos setores da economia é crescente, porém a sua viabilidade econômica depende essencialmente da competitividade de preços quando comparado com o hidrogênio cinza e outras fontes alternativas de energia²⁰.

O *Hydrogen Council* (2021) afirma que com o anúncio por diversos países e empresas durante o ano de 2020 de vários projetos de hidrogênio em giga-escala (equivalente a 175 mil toneladas a 100% de fator de carga), os custos de produção de hidrogênio seguem uma tendência de queda. Para o hidrogênio verde, um dos maiores impulsionadores para a redução nos custos é uma queda acelerada nos custos das energias renováveis acima dos níveis esperados, impulsionada pelos ganhos de escala e pelos baixos custos de financiamento das instalações. De acordo com o órgão (2021), os custos das renováveis em 2030 podem ser de até 15% inferiores aos estimados em 2020. As reduções mais fortes são esperadas em locais com disponibilidade ideal recursos, como Austrália, Chile, Norte da África e Oriente Médio. No Brasil, os custos de geração fotovoltaica e eólica reduziram significativamente nos últimos anos. Acredita-se em uma manutenção dessa tendência para os próximos anos, como fica evidenciado nos trechos extraídos da publicação da EPE (2018) "Premissas e Custos da Oferta de Energia Elétrica no Horizonte 2050":

"Além da melhoria técnica, se pôde observar também uma redução de custos através de economias de escala, resultantes da melhoria contínua do processo de fabricação e métodos de instalação e produtos. O crescimento da competitividade da energia eólica no Brasil se traduz nos preços da energia contratada desta fonte ao longo dos anos nos leilões de energia" (p. 16).

E ainda:

"Ao contrário de muitas tecnologias convencionais de geração elétrica, a fotovoltaica e a heliotérmica têm experimentado uma redução de custos ao longo dos últimos anos, derivada de inovações tecnológicas, aumentos na eficiência e economia de escala, principalmente. Esta redução de custos tem sido crucial na difusão de sistemas fotovoltaicos e usinas heliotérmicas durante a última década. Em geral, para as duas tecnologias, estima-se que a tendência continue ao longo do horizonte 2050, embora as quedas mais acentuadas devam acontecer ainda no horizonte decenal" (p. 17).

No entanto, é sabido que a disponibilidade de recursos renováveis aliado a um baixo custo na geração de energia não são elementos suficientes para reduzir significativamente os custos de projetos de hidrogênio verde.

Katsuhiro (2020) confirma que o custo das soluções de hidrogênio deve cair drasticamente dentro da próxima década. É afirmado na publicação que, para além dos custos reduzidos de geração de energia renovável, o aumento na demanda por componentes para a cadeia de produção e distribuição de hidrogênio nos próximos anos proporcionará uma redução dos custos de tais componentes em até 50% até 2030, tornando várias aplicações de hidrogênio competitivas quando comparadas a outras alternativas de baixo teor de carbono e até mesmo com as opções convencionais. Além disso, estima-se que para mais de 20 soluções apresentadas no estudo supracitado, tais como transporte de longa distância e serviço pesado, aquecimento industrial e matéria-prima da indústria pesada, os quais juntos compreendem aproximadamente 15% do consumo global de energia, a rota do hidrogênio apresenta-se como a opção viável para a descarbonização.

Em suma, a trajetória de custos pode ser atribuída principalmente ao aumento de escala que impacta positivamente os três principais fatores de custo, conforme descrito a seguir:

- Queda significativa no custo de produção de hidrogênio com baixo teor de carbono e renovável.
- Menores custos de distribuição e reabastecimento em decorrência de uma maior utilização da carga e ao efeito de escala na utilização da infraestrutura.
- Diminuição no custo de componentes para equipamentos de uso final devido ao aumento da escala de fabricação.

A IEA calcula que o preço de 1 kg de hidrogênio verde com um teor energético de 33,3 kWh perfaz um custo de EUR 3,40 a 5,00 enquanto o custo de hidrogênio cinza, forma mais utilizada na atualidade, custa em média 1,5 EUR/kg ou 0,045 EUR/kWh. A expectativa é que a diferença entre os valores dos hidrogênios cinza e verde deva deixar de existir até 2030 em decorrência de economia de escala para os eletrolisadores e a redução cada vez mais do custo de energia elétrica (IEEFA, 2020). Da mesma forma, projeções do *Hydrogen Council* (2021) informam que custos de produção de hidrogênio a partir de fontes renováveis poderiam cair para USD 1,4 a 2,3 por kg, até 2030, indicando que o hidrogênio verde e o cinza podem atingir a paridade de custos em mais regiões propícias (com maior disponibilidade de renováveis e boa distribuição de projetos de hidrogênio) até 2028, e entre 2032 e 2034 nas regiões de média propensão.

²⁰ As fontes alternativas de energias são renováveis, pouco ou não poluentes, além de apresentar a vantagem de ter baixos índices de agressão ambiental (EPE, 2021). <https://www.epe.gov.br/pt/glossario>. Acesso em 02.03.2021.

Em se tratando especificamente dos eletrolisadores, componente essencial na para a produção de hidrogênio verde, a Figura 4 apresenta que, para além dos custos de geração de energia elétrica renovável, os custos de produção e os ganhos de eficiência dos eletrolisadores podem contribuir significativamente para a redução nos custos de produção do hidrogênio.

Com a participação atual de menos de 5% na produção global de hidrogênio, pode-se concluir uma inexistência no atual momento de um mercado em grande escala e competitivo para a produção destes equipamentos. Acredita-se que o crescimento do mercado nos próximos anos trará uma redução de custos dos seus componentes como também será capaz de contribuir para um aumento da eficiência dos eletrolisadores.

Em um cenário de exportação de hidrogênio para suprir a demanda de países cuja capacidade de produção seja inferior à demanda interna, cabe também avaliar os custos de transporte intercontinentais do hidrogênio em suas diferentes formas. Segundo *Hydrogen Council*, os custos previstos em 2030 para o transporte de hidrogênio em larga escala (de 9.000 a 10.300 toneladas de H₂) em rotas a partir de 7.000 km até o porto de destino poderão ser inferiores a USD 2 a 3 /kg de H₂.

Como demonstrado na Figura 5, os custos de produção de amônia verde (NH₃) com origem no Chile para os Estados Unidos deverão ser cerca de USD 1,5/kg de H₂, e os custos totais de processamento (conversão em amônia e craqueamento) e transporte marítimo de USD 1,9 a 2,4 /kg de H₂, perfazendo um custo total estimado de 3,5 a 4,4 /kg de H₂. A Figura 5 também apresenta os custos de geração e transporte para casos de transporte de hidrogênio liquefeito LH₂ e LOHC.

Para a produção de hidrogênio verde de baixo custo, as cadeias de valor para eletrólise e controle das emissões de GEE precisam ser ampliadas, inclusive com apoio governamental. Tendo em vista a taxação de carbono já iniciado por vários países no mundo, os produtos derivados de hidrocarbonetos tendem a perder competitividade frente às fontes renováveis. O relatório de 2017 da *Carbon Pricing Leadership Coalition*, suportada pelo Banco Mundial, estimou que o preço de carbono apropriado em todo o mundo para ser consistente com o cumprimento das metas do Acordo de Paris precisaria ser de USD 40-80/t CO₂e até 2020, e USD 50-100/t CO₂e até 2030 (WORLD BANK, 2017). Até o momento, o preço do carbono está distante de se tornar mundialmente uniforme. Entretanto, um número crescente de países e regiões possuem, ou planejam implementar, esquemas de preços de carbono em vigor, seja através de metodologias *cap-and-trade* ou impostos de carbono. Dentre essa gama de países e regiões podemos citar incluem a União Europeia, Austrália, Coreia do Sul, África do Sul, China e o estado da Califórnia (LSE, 2018). Acredita-se que as políticas de precificação de carbono irão impulsionar o desenvolvimento da utilização do hidrogênio a partir dos equilíbrios de custos entre hidrogênio verde e cinza.

Devido às suas características geográficas e climáticas, o Brasil já possui uma disponibilidade acima das médias globais de participação de fontes renováveis em suas matrizes energética e elétrica (46,2% e 83% respectivamente, BEN EPE 2020). A expectativa de redução dos custos na geração de energias renováveis aliada à tendência de taxação de carbono poderá favorecer a produção de hidrogênio verde por custos muito competitivos.

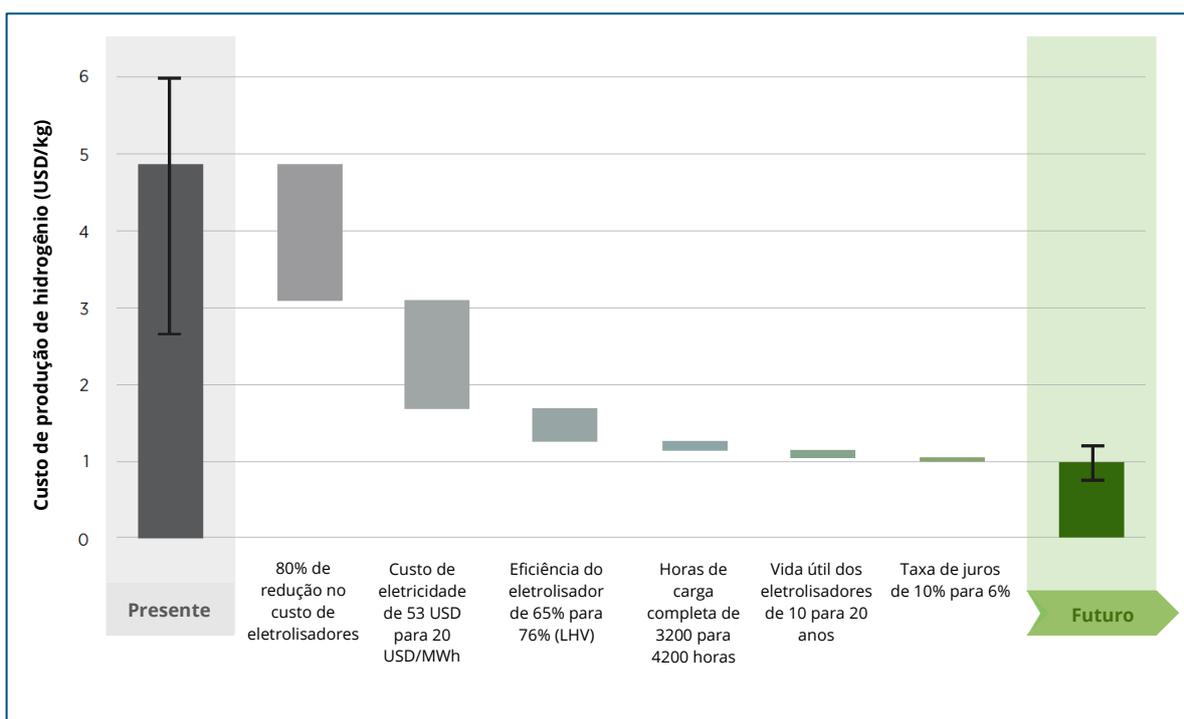


Figura 4 – Impactos no preço de H₂ verde. Fonte: IRENA (2020).

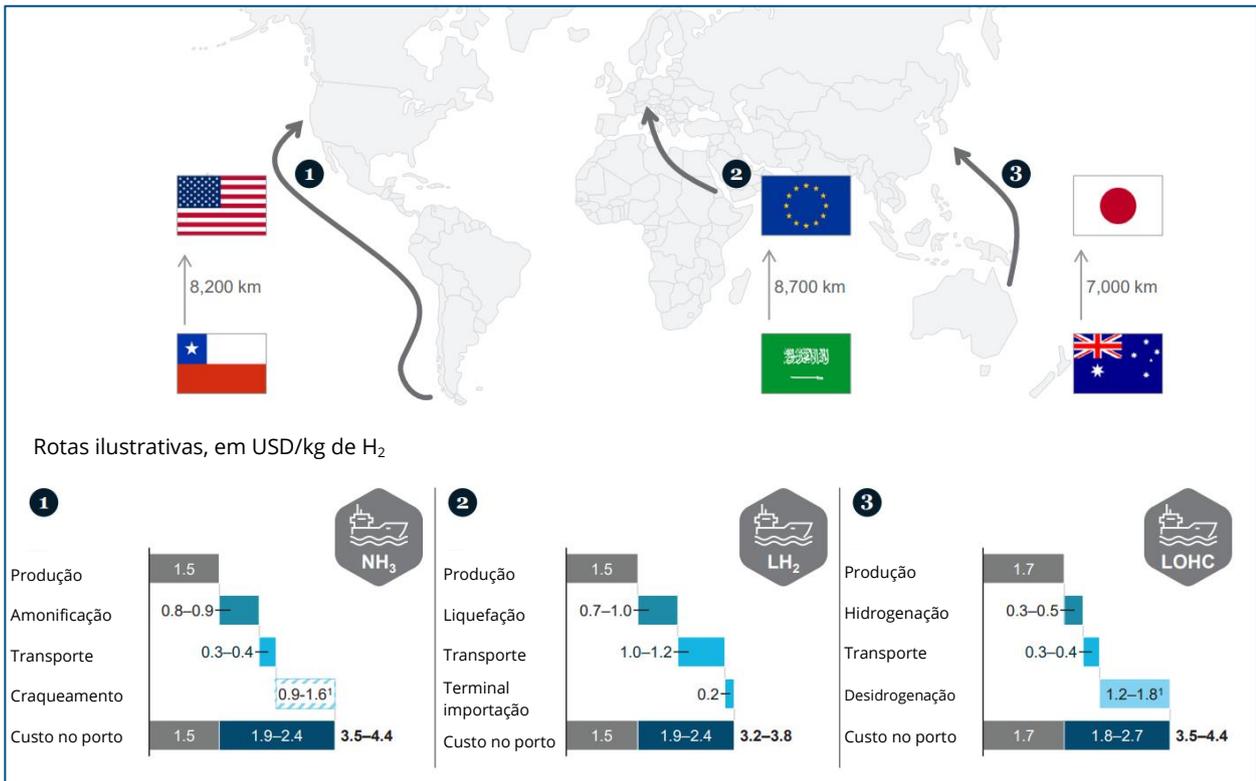


Figura 5 – Custos logísticos de H₂ intercontinentais. Fonte: Hydrogen Council (2021).

2. Hidrogênio verde no mundo – Estudos de caso

Esse capítulo possui como principal objetivo apresentar o atual cenário de hidrogênio verde no mundo. Nesse sentido, primeiramente será apresentado um panorama consolidado sobre as perspectivas de utilização dessa tecnologia para a descarbonização das economias através de um compilado sobre as estratégias e *roadmaps* publicadas até o momento, seguido de alguns exemplos concretos de como países e regiões ao longo do globo estão tratando essa temática na atualidade.

De acordo com o *Hydrogen Council* (2020), em 2050 o hidrogênio representará 18% de toda a energia consumida mundialmente, reduzindo anualmente 6Gt de emissões de CO₂ e eliminando os principais poluentes do ar como o dióxido de enxofre (SO₂), óxidos de nitrogênio (NO_x) e materiais particulados. O setor de transporte deverá consumir 20 milhões a menos de barris de petróleo por dia, aumentando significativamente a segurança energética dos países, e o crescimento econômico será baseado em um desenvolvimento sustentável, gerando uma receita de mais de USD 2,5 trilhões por ano e empregando mais de 30 milhões de pessoas mundialmente.

O estudo "*Hydrogen - Scaling Up*" foi um marco na produção de conteúdo detalhado sobre hidrogênio, no qual foi traçado um roteiro abrangente e quantificado para o desenvolvimento de economias de hidrogênio, considerando a sua contribuição para a transição energética. O estudo aponta para a relevância do hidrogênio como um vetor de energia e solução mais promissora para de setores de difícil descarbonização tais como de transportes e a industrial (HYDROGEN COUNCIL, 2017). Nesse sentido, o estudo apresenta ações para a utilização das tecnologias do hidrogênio e pilhas a combustível em diversos setores, de forma a atingir reduções nas emissões de CO₂ em até 60% até 2050, conforme disposto a seguir:

- Integração e otimização de fontes renováveis de energia em grande escala e a geração de energia descentralizada em setores e regiões;
- Armazenamento de energia, aumento da eficiência e melhoria do aproveitamento energético;
- Descarbonização do setor industrial a partir da utilização de fontes de energia renovável e alternativas²¹, e substituição de matérias-primas;

- Descarbonização do setor residencial produzindo calor e eletricidade sem emissões;
- Descarbonização da rede de distribuição de gás natural através da mistura e injeção de 5% a 20% de hidrogênio na rede existente;
- Descarbonização do setor de transportes com emissões veiculares nulas.

É notável a crescente adesão de diversas nações às tecnologias de hidrogênio para a descarbonização de suas economias. Uma análise realizada com 56 países pela consultoria alemã Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH (LBS GmbH) revelou que até agosto de 2020 um total de 9 países, correspondentes a 44% do PIB global, já possuíam estratégias nacionais de hidrogênio formalmente publicadas e que outros 14 países, responsáveis por 38% do PIB global, estavam apoiando projetos piloto e de demonstração de hidrogênio sem ainda possuírem uma estratégia formalmente divulgada. Estima-se que até 2025 todos os países que somados representam até 80% do PIB global irão desenvolver a sua estratégia de hidrogênio (WORLD ENERGY COUNCIL, 2020). A Figura 6 demonstra o estado de desenvolvimento das estratégias nacionais e ações de apoio governamental para projetos em hidrogênio no mundo. Países como a Alemanha, Espanha, Austrália, França, Portugal, Austrália e Noruega já possuíam em agosto de 2020 suas estratégias divulgadas. Em uma elevada parcela dos países ao longo do globo, as estratégias nacionais encontravam-se em elaboração. É importante informar que o Brasil integra na Figura 6 o grupo de países que apoiam projetos pilotos e de demonstração de hidrogênio.

²¹ As fontes alternativas de energias são renováveis, pouco ou não poluentes, além de apresentar a vantagem de ter baixos índices de agressão ambiental. <https://www.epe.gov.br/pt/glossario>. Acesso em 02.03.2021.

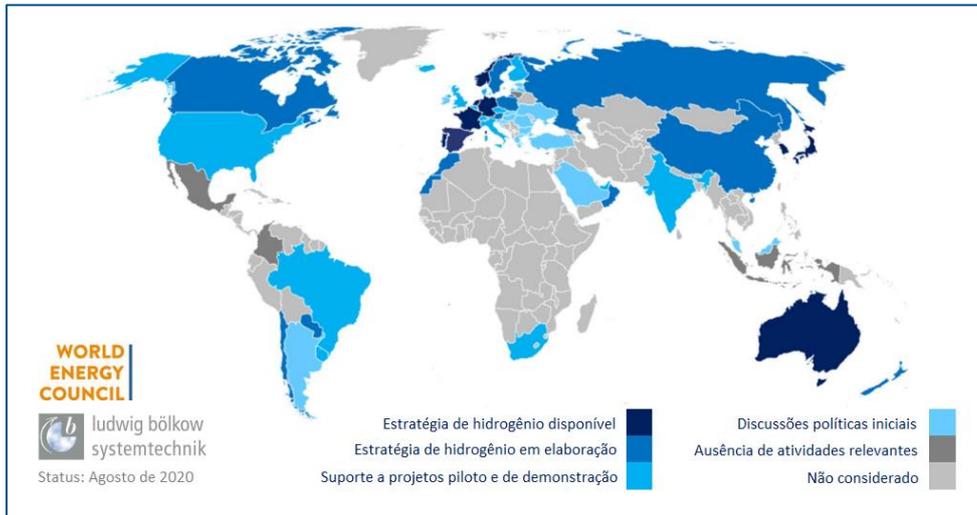


Figura 6 – Panorama das ações em H₂ por país. Fonte: World Energy Council/LBS GmbH (2020).

De forma geral, as estratégias nacionais e regionais para o hidrogênio possuem três principais objetivos, conforme apresentado a seguir:

1. Redução das emissões de GEE a partir da geração de hidrogênio por fontes renováveis (verde) ou com CCS e aplicação em setores de difícil descarbonização, como o industrial e de transportes;
2. Segurança energética por meio da utilização do hidrogênio verde como um vetor energético e diminuição da dependência de combustíveis fósseis;
3. Crescimento econômico sustentável a partir do desenvolvimento de uma cadeia de valor para a produção e consumo de hidrogênio domésticos, gerando prosperidade tecnológica, empregos e crescimento econômico.

Os objetivos principais se desdobram, por sua vez, em objetivos específicos. O vasto espectro de soluções para a descarbonização e oportunidades associadas ao desenvolvimento de uma economia de hidrogênio é amplamente reconhecido pelos países. No entanto, os objetivos específicos de cada país e, portanto, o direcionamento de cada país em relação ao desenvolvimento de uma economia de hidrogênio é tipicamente reflexo de seus interesses nacionais, bem como de suas vantagens e desvantagens comparativas a serem trabalhadas no futuro.

Nesse sentido, a Tabela 3 compila os principais objetivos específicos de 15 países, além da União Europeia e do estado da Califórnia. Foram listados os seguintes objetivos: Redução das emissões de GEE, Diversificação da matriz energética, Promoção do crescimento econômico, Desenvolvimento de tecnologia nacional, Integração de fontes renováveis e Desenvolvimento de mercado exportador de hidrogênio. Os campos sinalizados (✓) confirmam a presença do objetivo na respectiva estratégia nacional. Os campos não sinalizados correspondem à ausência do objetivo ou ainda a uma menor relevância do mesmo na estratégia nacional.

Tabela 3 – Objetivos específicos das estratégias nacionais. Fonte: World Energy Council/LBS GmbH (2020). Elaboração própria²².

Objetivos	União Europeia	Alemanha	Países Baixos	França	Espanha	Itália	Reino Unido	Noruega	Suíça	Ucrânia	Rússia	Japão	Coreia do Sul	China	Austrália	Califórnia	Marrocos	Chile
Redução das emissões	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Diversificação da matriz energética	✓	✓		✓					✓		✓		✓					
Promoção do crescimento econômico	✓	✓	✓	✓			✓				✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Desenvolvimento de tecnologia nacional	✓	✓	✓	✓			✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Integração de fontes renováveis	✓	✓	✓	✓	✓	✓			✓	✓	✓		✓		✓	✓	✓	✓
Desenvolvimento de mercado exportador				✓					✓	✓				✓		✓	✓	✓

Percebe-se que a maior parte dos países possuem objetivos similares como a promoção do desenvolvimento, redução das emissões e integração de fontes renováveis. No entanto, destacam-se os objetivos claros de exportação de hidrogênio os países com elevada disponibilidade de fontes renováveis: Espanha, Ucrânia, Rússia, Austrália, Marrocos e Chile. Para esses, a exportação do hidrogênio apresenta-se como um fator adicional de promoção de crescimento econômico.

Por fim, cumpre ressaltar que as estratégias nacionais também apresentam enfoques setoriais específicos tais como indústria, transportes e residências, conforme apresentado no Item 1.5 do presente estudo. De maneira geral, pode-se afirmar que a maior parcela das estratégias nacionais possui enfoque nos segmentos industriais de difícil descarbonização e/ou eletrificação, como é o caso das indústrias siderúrgica, vidros planos, mineração e de cimento. Além disso, as estratégias de países asiáticos tais como o Japão, Coreia do Sul e China possuem grande enfoque no setor de transportes. Serão apresentados ainda no presente capítulo mais detalhes sobre algumas estratégias nacionais de forma individual, para apresentar previamente um panorama dos projetos em hidrogênio em hidrogênio no mundo.

Atualmente o mundo conta com 228 projetos anunciados em hidrogênio, totalizando mais de USD 80 bilhões em investimentos (HYDROGEN COUNCIL, 2021). Conforme apresentado na Figura 7, um total de 17 são projetos de produção já anunciados em larga escala (ou seja, mais de 1 GW para renováveis e mais de 200 mil toneladas por ano para hidrogênio com baixo teor de carbono), cujos maiores estão localizados na Austrália, Europa, Chile e Oriente Médio. Além disso, 90 projetos possuem aplicação industrial em larga escala, outros 53 na área de transportes

e 23 em infraestrutura (distribuição, armazenamento, transporte entre outros). Por fim, um total de 45 projetos envolvem o acoplamento de setores com uma economia integrada em hidrogênio. Enquanto os projetos no Japão e na Coreia do Sul possuem predominância de aplicações no transporte rodoviário, amônia verde, LH₂ e projetos LOHC, a Europa lidera os projetos integrados de economia de hidrogênio.

Em relação aos investimentos governamentais para o desenvolvimento de economias de hidrogênio, estes já totalizam atualmente USD 70 bilhões anunciados. Já em relação ao volume total de investimentos em projetos de hidrogênio, o *Hydrogen Council* informa (2021) um volume de USD 300 bilhões até 2030. É válido ressaltar que devido ao estágio inicial de alguns projetos, 75% do volume anunciado (equivalente USD 225 bilhões), ainda não possuem um compromisso de investimento, o que deverá ser ratificado conforme a evolução dos projetos. Até o ano de 2030 o *Hydrogen Council* estima USD 80 bilhões de investimentos confirmados. Estes incluem USD 45 bilhões na fase de planejamento, o que significa que atualmente as empresas estão realizando dispêndios consideráveis no desenvolvimento de projetos. Outros USD 38 bilhões envolvem projetos comprometidos ou em construção, comissionados ou já em operação.

De modo a exemplificar o cenário mundial atual do hidrogênio, foram selecionados os países e regiões líderes em políticas e iniciativas para descarbonização de diversos setores da economia tais como os Estados Unidos, Austrália, Coreia do Sul, Austrália, Países Baixos, União Europeia, Portugal e Alemanha. Esses países possuem metas ambiciosas de incremento de uso do hidrogênio verde em substituição às fontes não renováveis bem como em novas aplicações *Power-to-X*.

²² Foi incluído o Chile à análise, que na época da publicação do estudo ainda não havia estratégia nacional publicada.

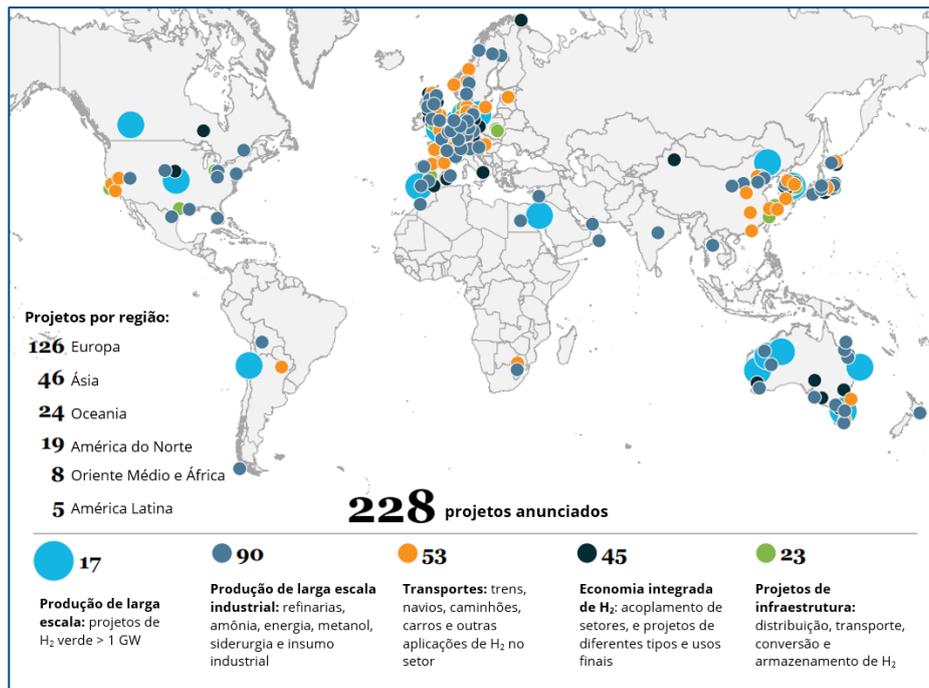


Figura 7 – Projetos em H₂ no mundo. Fonte: Hydrogen Council (2021).

2.1 Estados Unidos

Desde 1970 o Departamento de Energia (DOE) desenvolve programas para o desenvolvimento de tecnologias e incentivos para a comercialização de hidrogênio e células a combustível nos setores de transporte, serviços públicos e indústria, obtendo até o momento, resultados de cerca de 80% nas reduções do custo dos eletrolisadores (quando comparado à década de 1970) e mais de 1.100 patentes geradas (DOE, 2020).

Ainda de acordo com o DOE, a década de 2020 será crucial para o desenvolvimento de setores da economia mais sustentáveis com geração de empregos. Algumas políticas importantes incluem²³:

- Aprovação de uma meta nacional de emissões líquidas de gases de efeito estufa em toda a economia até 2050;
- Acelerar a transição para caminhões e ônibus com emissão zero por meio de padronização dos níveis de emissão, incluindo a normativa *Advanced Clean Trucks*²⁴ e expansão das colaborações interestaduais, a exemplo do memorando de entendimento recentemente assinado por 15 estados federados e o distrito de Columbia para veículos de cargas média e pesada com emissões zero;
- Estabelecer um mandato de aquisição para as concessionárias de gás para a mistura a um nível mínimo e seguro de hidrogênio verde no gás natural fornecido a edifícios;
- Incluir incentivos para implantação de hidrogênio verde em pacotes de estímulo de curto prazo. Os incentivos podem ser direcionados a projetos de demonstração da utilização de hidrogênio verde na fabricação de aço e indústrias demandantes de alta temperatura para seus processos bem como em refinarias e indústria de fertilizantes;
- Estabelecer padrões de aquisição para aço “verde” em projetos de infraestrutura pública e fertilizantes “verdes” em projetos agrícolas públicos.

²³ <https://www.hydrogen.energy.gov/mission.html#:~:text=The%20mission%20of%20the%20Hydrogen,hydrogen%20and%20fuel%20cell%20technologies>. Acesso em 07.08.2020.

²⁴ Legislação aprovada em 2020 no estado da Califórnia que estabelece que montadoras de caminhões comercializem um número crescente de veículos sem emissões de GEE. A legislação entrará em vigor em 2024 com uma cota mínima de comercialização de veículos sem emissões de 5% podendo chegar a 75% em 2035 de acordo com a classe do veículo. Mais informações podem ser acessadas em <https://www.nrdc.org/experts/patricio-portillo/ca-takes-step-forward-new-clean-truck-proposal>. Acesso em 06.03.2021.

Uma coalizão das principais empresas de petróleo e gás, energia, automotiva, célula de combustível e hidrogênio se uniram para desenvolver um *roadmap* para a Economia do Hidrogênio nos Estados Unidos. O documento denominado "*Road Map to a US Hydrogen Economy*" (*Roadmap* para uma Economia de Hidrogênio nos EUA, tradução própria) enfatiza que o hidrogênio, além crucial para uma matriz energética de baixo carbono e redução das emissões de GEE, irá fortalecer a segurança energética norte-americana por meio da utilização de recursos energéticos domésticos bem como promoverá a versatilidade do hidrogênio como um facilitador do sistema de energia renovável, aumentando a resiliência do sistema e fortalecendo a economia do país. De acordo com o documento, em 2050 a economia de hidrogênio nos EUA poderá gerar receitas estimadas de USD 750 bilhões por ano e 3,4 milhões de empregos cumulativos. Além disso, estima-se que por meio das ações propostas no *roadmap*, o hidrogênio será capaz de suprir 14% da demanda energética final no país em 2050.

Nesse sentido, o documento apresenta um planejamento detalhado de como os EUA podem expandir sua liderança global em energia, aumentando a atividade na economia de hidrogênio com rápida evolução e emergência, a partir da interação de ações entre o governo e a indústria em prol desse desenvolvimento. Tais ações são detalhadas em quatro fases, segmentadas em anos. A primeira fase contempla os anos de 2020 a 2025, a segunda fase os anos de 2023 a 2025, a terceira os anos de 2026 a 2030 e por fim, a quarta fase contempla os anos de 2031 em diante. Cada uma das quatro fases apresenta marcos para a implementação do hidrogênio em diversas aplicações, bem como ações demandadas para possibilitar a viabilização da implementação, tanto por parte do governo quanto por parte da cadeia de suprimentos e consumidores finais do hidrogênio. Em relação à atuação governamental, o *roadmap* reforça a importância da criação de incentivos apropriados para permitir investimentos privados e o desenvolvimento do mercado de hidrogênio durante as duas primeiras fases do *roadmap*, com destaque para P&D,

regulação e desenho de mercado. Já na terceira fase (2026 a 2030) estão previstas as reduções dos incentivos governamentais e incremento de mecanismos para a escala de mercado. Por fim, a partir de 2031, estima-se a ausência ou reduzida presença de incentivos governamentais no mercado de hidrogênio, em decorrência do atingimento da paridade de custos quando comparado a outras fontes de energia. A relação completa das ações governamentais e do setor privado, para cada uma das fases, podem ser consultadas no capítulo "*Road Map To A Hydrogen Economy*" (FCHEA, 2020, 63-78)²⁵.

Em nível regional, o estado federado da Califórnia vem se destacando nos últimos anos como uma das regiões do globo com maior comprometimento às metas de descarbonização a partir do incentivo de uma economia sustentável. O estado se comprometeu a reduzir suas emissões de GEE em 80% ou menos até 2050 (em relação a 1990), com uma meta provisória ambiciosa de redução de 40% até 2030 (EFI, 2019).

A associação chamada *California Fuel Cell Partnership* (CAFCP) foi criada em 1999 e desde então segue ao que eles denominam "*Fuel Cell Revolution - Theory of Change*" ("*Revolução das Pilhas a Combustível - Teoria de Mudança*", tradução própria). Segundo a CAFCP, a teoria da mudança é baseada em 1) capacitar o mercado, 2) consolidar o mercado e 3) expandir o mercado.

A meta da *California Fuel Cell Partnership* é ter 1.000 estações de hidrogênio e um milhão de carros de passeio, ônibus e caminhões movidos a célula de combustível até 2030, com um consumo de 693 milhões de galões de gasolina a menos por ano, evitando a emissão de 2,7 milhões de toneladas de CO₂ e 3.900 toneladas de NO_x por ano. Com base nessa visão, a CAFCP lançou recentemente um roteiro para incentivar a aquisição de ônibus com emissão zero até 2029²⁶. Pela política atual de incentivo em vigor, residentes da Califórnia recebem um abatimento de até USD 4.500 e o Governo Federal oferece até USD 8.000 de crédito na compra de veículos a pilha a combustível.

²⁵ Disponível em www.ushydrogenstudy.org. Acesso em 11.01.2021.

²⁶ <https://cafcp.org/blog/us-hydrogen-road-map-released>. Acesso em 11.01.2021.

2.2 União Europeia

Não apenas em âmbito nacional, mas também em escala internacional estão sendo tomadas medidas concretas em prol do desenvolvimento do hidrogênio verde. A União Europeia apresenta-se como um excelente exemplo para o segundo caso. Em novembro de 2018, a Comissão Europeia apresentou uma visão estratégica a longo prazo para reduzir as emissões de GEE, mostrando como a Europa pode contribuir para a neutralidade climática, ou seja, uma economia com zero emissões líquidas de GEE. Desde então, diversas metas e ações vem sido criadas no intuito de sedimentar ações para descarbonizar as economias do bloco europeu.

Nesse sentido, em dezembro de 2019 foi apresentado o Pacto Ecológico Europeu (*European Green Deal*), cujo principal objetivo é o cumprimento de um plano de ação para impulsionar a utilização eficiente dos recursos através da transição para uma economia limpa e circular, restaurando a biodiversidade e reduzindo os níveis de poluição (COMISSÃO EUROPEIA, 2020). No presente momento as metas europeias de descarbonização para 2030 e 2050 são as seguintes:

- **Até o ano de 2030:**
40% de redução nas emissões de CO₂ (comparado a 1990), 32% de participação de fontes renováveis de energia e 32,5% de incremento em eficiência energética²⁷.
- **Até o ano de 2050:**
100% de neutralidade de emissões.

Dessa forma, a União Europeia pretende que em 2050 o seu impacto no clima seja neutro, isto é, uma economia com zero emissões líquidas de gases de efeito de estufa.

Esse objetivo constitui um elemento central do Pacto Ecológico Europeu e está em consonância com os compromissos assumidos pelos países da UE no quadro do Acordo de Paris. Atualmente, tramita a chamada “Lei Europeia do Clima” para transformar o atual compromisso de descarbonização em esfera política para uma obrigação jurídica. Diante de tais metas ambiciosas de descarbonização para a União Europeia nos próximos 30 anos, será apresentado a seguir como o hidrogênio verde pode contribuir para o atingimento de tais metas.

A publicação elaborada em 2019 pela parceria-público privada *Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking* denominada “*Hydrogen Roadmap Europe: A Sustainable Path for the European Energy Transition*” foi desenvolvida a partir das contribuições de 17 principais atores industriais europeus. O estudo aponta para o fato de o hidrogênio ser um elemento essencial na transição energética, podendo representar 24% da demanda de energia final e 5,4 milhões de empregos na União Europeia até 2050. O documento ainda traça um caminho para a implantação em larga escala de hidrogênio e pilhas a combustível até 2050 e quantifica os impactos socioeconômicos associados.

Além dos potenciais da implantação em larga escala do hidrogênio verde citados anteriormente, o relatório detalha importantes benefícios socioeconômicos e ambientais associados a essa tendência na União Europeia, tais como a movimentação de um mercado de aproximadamente USD 745,5 bilhões (EUR 820 bilhões) e redução total de 560 Mt de CO₂. O relatório traz ainda um roteiro para a *ramp-up* da implantação de mercado em todos em diversos setores da economia, estabelecendo marcos específicos até o ano de 2050.

²⁷ Disponível em https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2030_pt. Acesso em 17.09.2020.

2.3 Países Baixos

Em fevereiro de 2019 a União Europeia lançou um edital chamado “Vale de Hidrogênio”, o qual combina produção de hidrogênio verde, distribuição e uso em diversos setores da economia. O edital obteve no total seis propostas de grandes consórcios de países e instituições de toda a Europa e o grande vencedor foram os Países Baixos com o projeto “HEAVENN”²⁸. O projeto prevê vales de hidrogênio no norte da Holanda na ilha de Gronningen, Delfzijl e Emmen com a produção de hidrogênio verde através de energia eólica²⁹. O orçamento total desse projeto é de EUR 90 milhões com 31 parceiros da iniciativa pública e privada. O projeto inclui a descarbonização do porto de Roterdã, o uso do hidrogênio em carros de passeio e no transporte urbano, no transporte marítimo de carga e de passageiros, na implementação da infraestrutura de hidrogênio em todo país, o uso do hidrogênio adicionado à querosene para aviação e no uso do hidrogênio para geração de calor para residências e escritórios. Além disso, o projeto prevê o armazenamento do hidrogênio em cavernas de sal.

Posteriormente ao lançamento do projeto supracitado, o governo dos Países Baixos apresentou, em março de 2020, a sua estratégia nacional de hidrogênio (*Government Strategy on Hydrogen*)³⁰. Essa estratégia visa a capacidade de eletrólise de 3 a 4 GW em 2030 por meio de parcerias público-privadas. Assim como em outras estratégias e *roadmap*, o papel do governo no incentivo de ações de P&D, regulação e desenho de mercado é destacado como fundamental.

A estratégia constata o grande potencial para o desenvolvimento de uma economia de baixo carbono com base no hidrogênio verde na região a partir de condições de partida geográficas, climáticas e econômicas favoráveis, tais como:

- Elevado potencial eólico offshore no Mar do Norte para produção de hidrogênio verde;
- Disponibilidade de rede de transporte do gás em decorrência da cessão da exploração do gás natural na região de Groningen;
- Maturidade da indústria local para adesão do hidrogênio verde em seus processos produtivos, em decorrência de diversos projetos pilotos em realização;
- Posição geográfica favorável e infraestrutura portuária desenvolvida capaz de abastecer a Europa e outras regiões do globo com hidrogênio verde (potencial para atuação como um *hub* de hidrogênio verde).

Além da apresentação de ações para o desenvolvimento do mercado de hidrogênio verde na região, a estratégia deverá servir como base para a formulação e desenvolvimento de um Programa Nacional de Hidrogênio a ser executado a partir de 2022. O programa será de natureza adaptativa e os projetos executados até o final de 2021 serão tomados como ponto de partida para o programa. Para a sua elaboração, diversos atores da cadeia de valor de hidrogênio dos Países Baixos serão consultados.

²⁸ Para mais informações acesse: <https://www.newenergycoalition.org/en/hydrogen-valley/#:~:text=The%20HEAVENN%20project%20is%20unique,parties%20from%206%20European%20countries>. Acesso em 17.09.2020.

²⁹ Para mais informações acesse: <https://www.snn.nl/en/nieuws/eu-support-for-the-green-hydrogen-region-of-europe-northern-netherlands>. Acesso em 17.09.2020.

³⁰ Disponível em https://1fa05528-d4e5-4e84-97c1-ab5587d4aabf.filesusr.com/ugd/45185a_f22f45f329cf4841b7604f0c4e6d9c0b.pdf. Acesso em 20.01.2021.

2.4 Alemanha

A Alemanha, comprometida com as metas de descarbonização do Acordo de Paris e no Pacto Ecológico Europeu, vem tomando diversas medidas concretas em prol da promoção de uma transição energética de forma segura, limpa e de baixo custo. Nesse sentido, o governo federal alemão se comprometeu a hibernar todas as suas usinas nucleares até 2022, reduzir em 55% as emissões de GEE em 2030, atingir uma participação de 65% de fontes renováveis na matriz elétrica. Além disso, o país considera as tecnologias de hidrogênio verde e PtX essenciais para a descarbonização de sua economia. Do ponto de vista do Governo Federal Alemão, apenas o hidrogênio produzido com base em energias renováveis é sustentável a longo prazo. Portanto, o objetivo é apoiar uma rápida aceleração deste mercado e estabelecer cadeias de valor apropriadas. Para atingir esse objetivo o país lançou em junho de 2020 a Estratégia Nacional de Hidrogênio (NWS)³¹.

A NWS detalha 12 objetivos e metas concretas dispostos para os setores de produção de hidrogênio, indústria, transportes, geração energética de calor, pesquisa, educação e inovação, os quais serão listados a seguir:

- Assumir responsabilidade global para reduzir os efeitos dos gases efeito estufa;
- Tornar o hidrogênio verde competitivo;
- Desenvolver o mercado doméstico para tecnologias de hidrogênio, abrindo caminho para as importações;
- Estabelecer o hidrogênio como fonte alternativa de energia;
- Usar o hidrogênio como matéria-prima para uma indústria sustentável;
- Implementar a infraestrutura de transporte e distribuição, desenvolvendo o comércio exterior e mercados consumidores;
- Promover a pesquisa, a educação e a inovação;
- Acompanhar os processos de transformação através do diálogo com toda a sociedade;
- Fortalecer a economia e garantir oportunidades de mercado global para as empresas alemãs;
- Implementar uma infraestrutura de qualidade para geração, transporte e armazenamento de hidrogênio, expandindo ainda mais o seu consumo e gerando confiança do mercado;
- Estabelecer mercados internacionais e parcerias para o hidrogênio;
- Promover a cooperação global.

No que tange os objetivos voltados para a cooperação internacional, a Alemanha vem sinalizando de forma concreta o interesse em realizar parcerias para a consolidação das tecnologias de hidrogênio verde e respectivas rotas globais de distribuição. Com isso, o país pretende promover a redução nos custos e acelerar a viabilidade de projetos de produção e fornecimento de hidrogênio para os setores da economia de difícil descarbonização e/ou eletrificação, tais como os setores da indústria com elevada demanda energética e o setor de transportes.

Conforme apresentado no Item 1.3, estimativas atuais indicam que a Alemanha precisará importar, em 2050, 45 milhões de toneladas de hidrogênio verde, equivalente a 2.250 TWh. Nesse sentido, foram anunciados, em 2020, EUR 2 bilhões para a promoção de parcerias internacionais e mais recentemente foi lançado o projeto denominado “H2 Global”, o qual visa a promover as bases para a expansão do mercado de hidrogênio verde e produtos PtX (GERMANY, 2020).

O conceito prevê a compensação temporária da diferença entre o preço de compra e o preço de venda (atualmente corresponde ao preço de mercado do hidrogênio de fontes fósseis) para o hidrogênio verde e seus derivados. Ao subsidiar indiretamente o preço do hidrogênio verde por um período de tempo limitado, objetiva-se estimular a demanda de longo prazo no mercado alemão pelo gás, a fim de fornecer incentivos para investimentos privados na infraestrutura de produção, transporte e aplicação do hidrogênio tanto na Alemanha como no exterior. Nesse sentido, o projeto aborda em particular o acelerado aumento na demanda de importação previsto para os próximos anos no fornecimento de hidrogênio verde e produtos PtX na Alemanha (H2 Global, 2021).

Atualmente uma ampla gama de projetos no tema hidrogênio verde e pilhas a combustível encontram-se em execução na Alemanha. Em abril de 2019, a Alemanha já contava com 62 projetos de tecnologia *Power-to-Gas*³². Tais projetos possuem tanto o cunho experimental (P&D, piloto etc.) como também de caráter comercial. Uma listagem completa dos projetos (um total de 404 projetos até o momento), organizados por categoria, fonte de financiamento, setor e áreas de aplicação, pode ser consultada em <https://www.now-gmbh.de/>.

³¹ Para mais informações acesse: <https://www.newenergycoalition.org/en/hydrogen-valley/#:~:text=The%20HEAVEN%20project%20is%20unique,parties%20from%206%20European%20countries>. Acesso em 17.09.2020.

³² Para mais informações acesse: <https://www.snn.nl/en/nieuws/eu-support-for-the-green-hydrogen-region-of-europe-northern-netherlands>. Acesso em 17.09.2020.

2.5 Portugal

Portugal aprovou em julho de 2020 sua Estratégia Nacional para o Hidrogênio (EN-H2) com investimentos na ordem de EUR 9 bilhões. Na estratégia, estão previstos investimentos para a instalação de uma unidade industrial de produção de eletrolisadores na cidade portuária de Sines, com capacidade de produção de 1 GW até 2030. Acredita-se a partir desses investimentos será possível posicionar Portugal como um importante centro de produção de hidrogênio verde.

No âmbito desta estratégia, o hidrogênio representa uma oportunidade para o desenvolvimento da economia portuguesa no horizonte de 2030 a partir das reduções das importações de gás natural em cerca de EUR 380 e 740 milhões e de amônia em cerca de EUR 180 milhões. Da mesma forma está prevista a criação de 8.500 a 12.000 novos empregos, diretos e indiretos a partir do desenvolvimento de uma economia de hidrogênio no país. Portugal pretende promover a descarbonização do setor dos transportes pesados e a indústria nacional, sobretudo, dos subsetores químico, extrativo, de vidro e cerâmica e do cimento. Outro objetivo é a criação de um laboratório colaborativo para o hidrogênio, enquanto referência nacional e internacional de atividade de P&D.

A EN-H2 tem por objetivo promover a introdução gradual do hidrogênio rumo a uma economia descarbonizada. O país aposta na produção e na incorporação de gases renováveis, com enfoque no hidrogênio verde, promovendo desta forma a substituição de combustíveis fósseis nos setores onde a eletrificação não é financeiramente eficaz (REPÚBLICA PORTUGUESA, 2020).

2.6 França

A França foi, juntamente com o Japão e a Coreia do Sul, pioneira na divulgação de um planejamento estratégico para o desenvolvimento de uma economia de hidrogênio no país. Ainda em junho de 2018 foi anunciado pelo governo francês um plano de implementação do hidrogênio, denominado *"Hydrogen Deployment Plan"* contendo metas ambiciosas para a economia de hidrogênio em um curto prazo de cinco anos (2023), tais como a inserção de 5.000 veículos movidos a pilha a combustível e a instalação de 100 estações de abastecimento de hidrogênio, além do crescimento da participação do hidrogênio verde para 10% da produção de hidrogênio total³³.

Posteriormente, a França também lançou em setembro de 2020 sua estratégia nacional para o hidrogênio, denominada *"Stratégie nationale pour le développement de l'hydrogène décarboné en France"*, a qual prevê investimentos na ordem de EUR 7 bilhões, dos quais EUR 3,4 bilhões até 2023, a serem destinados a três setores identificados como prioritários para a descarbonização da economia francesa, conforme detalhado a seguir.

A primeira prioridade apontada na estratégia francesa para o hidrogênio é a descarbonização da indústria, contando com 54% dos investimentos governamentais (aproximadamente EUR 1,84 bilhões). Para tal, o governo francês pretende desenvolver um setor de eletrolise nacional para possibilitar a geração de hidrogênio verde em larga escala. Dessa forma, estabeleceu-se a meta de 6,5 GW de eletrolisadores instalados até 2030. Para acelerar a descarbonização da indústria francesa, a estratégia propõe um conjunto de ferramentas que permitirão tornar a produção por eletrólise mais confiável, adaptar e desenvolver processos industriais e apoiar financeiramente a indústria enquanto o preço do hidrogênio não for competitivo em relação a combustíveis e outros insumos industriais de origem fóssil.

A segunda prioridade identificada é o setor de mobilidade, o qual receberá 27% dos investimentos até 2030 (EUR 918 milhões). Nesse sentido, o governo francês objetiva priorizar o desenvolvimento de soluções para veículos pesados a partir de pilhas a combustível de hidrogênio. É válido ressaltar a relevância desse setor para a economia francesa, que movimentava anualmente EUR 100 bilhões e emprega cerca de 225.000 pessoas.

Por fim, a terceira área prioritária para o desenvolvimento de uma economia de hidrogênio francesa é a área de pesquisa, desenvolvimento e inovação (P,D&I). Essa área receberá os 19% restantes (EUR 646 milhões) do volume de investimentos até 2030 e permitirá a continuidade das pesquisas e inovação em hidrogênio verde. São citados na estratégia de hidrogênio verde temas de P,D&I tais como a descarbonização do setor de transportes (marítimo e aéreo) e industrial (siderúrgico e de fertilizantes), entre outros.

Mais recentemente em janeiro de 2021 a Associação Francesa de Hidrogênio e Pilhas a Combustível (Afhyprac - *L'Association Française pour l'Hydrogène et les Piles à Combustible*) publicou o documento *"Propostas do setor de hidrogênio para o desenvolvimento de uma indústria de hidrogênio renovável e de baixo carbono na França"* (*"The Hydrogen sector's proposals for the development of a renewable and low-carbon hydrogen industry in France"*). O documento consiste na apresentação de ações nos mais diversos setores da economia francesa para o desenvolvimento do hidrogênio verde no país, incluindo valores de investimento necessários. Para a sua elaboração, a Afhyprac ouviu diversos atores da cadeia de valor do hidrogênio no país (geradores, consumidores, fornecedores de tecnologia, institutos de P,D&I, entre outros) e concluiu que o desenvolvimento de um mercado de hidrogênio verde no país depende sumariamente da junção de esforços públicos e privados. A partir dessa premissa, o documento apresenta a meta de produção de 700.000 toneladas de hidrogênio de baixo carbono em 2030, o que corresponderia a 52% do total de hidrogênio consumido pela indústria e outros setores, como o de transportes (1.345 milhões de toneladas). Com o atingimento dessa meta, estima-se que até 2030 as emissões de CO₂ no país seriam reduzidas em mais de 20 milhões de toneladas e empregos na ordem de 120.000 a 250.000 seriam criados (novos empregos ou requalificação de empregos existentes). Para tanto, serão necessários EUR 24 bilhões em investimentos até 2030, dos quais são esperados ao mínimo EUR 6,7 bilhões de origem pública. Esse último valor está em consonância com os valores de investimento público informados pelo governo francês em sua estratégia nacional para o hidrogênio.

³³ <https://www.gouvernement.fr/en/hydrogen-plan-making-our-country-a-world-leader-in-this-technology-0>. Acesso em 04.03.2021.

2.7 Austrália

A Austrália possui elevada participação no comércio internacional de combustíveis fósseis. Em 2019 o país figurou como o segundo maior exportador de carvão mineral (213 milhões de toneladas) e juntamente do Qatar, como o primeiro exportador de gás natural (79 milhões de toneladas) (COAG, 2020). O país se comprometeu, pelo Acordo de Paris, com metas de redução de emissões de GEE de 26 a 28% em 2030 e, apesar da baixa participação de atualmente 6% em sua matriz energética, as fontes renováveis vêm crescendo continuamente. Apenas entre 2018 e 2019 a geração de energia solar cresceu 50% e as fontes renováveis corresponderam a 21% da matriz elétrica do país. Em 10 anos a participação das fontes renováveis na matriz elétrica australiana dobrou, sendo a biomassa responsável por 45% de toda a geração renovável (AUSTRALIAN GOVERNMENT, 2020b). Nesse sentido, o governo australiano vem investindo em diversas estratégias para descarbonizar sua economia, dentre as quais podemos citar a elaboração de um *roadmap* para investimentos com fins de aceleração do desenvolvimento e comercialização de novas tecnologias de baixa emissões de GEE (AUSTRALIAN GOVERNMENT, 2020b), assim como uma estratégia nacional de hidrogênio.

A “Estratégia Nacional de Hidrogênio Australiana” (“*Australia’s National Hydrogen Strategy*”) apresenta um plano para o desenvolvimento de uma indústria de hidrogênio na Austrália. Como uma série de atividades já se encontram em andamento, o *roadmap* supracitado apresenta, de forma complementar à estratégia, formas de investimentos em hidrogênio para as diversas partes interessadas (por exemplo, indústria, governo e pesquisa), de modo que os projetos em hidrogênio possam continuar a crescer de forma coordenada e orgânica. Destaca-se a estratégia de desenvolvimento de *hubs* em diversas regiões do país capazes de fornecer hidrogênio verde em larga escala tanto para os consumidores locais (indústria, transportes etc.) como para exportação. Assim, os *hubs* irão possibilitar o desenvolvimento de uma infraestrutura a custos reduzidos, promovendo ganhos de eficiência a partir de economias de escala (com o aumento na produção reduzindo o custo médio do produto), da inovação e de sinergias no acoplamento de setores. Outra particularidade da estratégia australiana é seu caráter adaptativo, por meio do qual as ações definidas para o crescimento da economia de hidrogênio verde australiana serão constantemente avaliadas, e caso necessário, adaptadas de acordo com as evoluções tecnológicas e demandas do mercado nacional e internacional de hidrogênio.

Tal estratégia de caráter adaptativo é focada em quatro princípios, conforme descritos a seguir:

- Adoção de uma abordagem adaptativa e coordenada nacionalmente para apoiar o desenvolvimento da indústria, incluindo revisões periódicas;
- Priorização da consistência regulatória e uma abordagem coordenada para a aprovação de projetos;
- Apoio de parcerias nacionais e internacionais para impulsionar o mercado;
- Priorização dos temas de segurança, sustentabilidade ambiental e os benefícios para os australianos do desenvolvimento da economia de hidrogênio.

De acordo com a estratégia, a competitividade do hidrogênio em termos de custo em aplicações locais, como transporte e sistemas de energia em áreas remotas, será alcançada com base nas reduções de custos potenciais até 2025.

Além disso, o desenvolvimento de uma indústria de exportação de hidrogênio representa uma oportunidade significativa para a Austrália e um potencial decisivo para o crescimento da indústria local e do setor de energia em geral devido aos ganhos de escala associados (AUSTRALIAN GOVERNMENT, 2020b). A estratégia demonstra que, embora a assistência do governo seja necessária para impulsionar a indústria, a mesma pode se tornar economicamente sustentável ao longo do tempo. Como benefícios gerados a partir do desenvolvimento de uma indústria australiana de hidrogênio, estima-se a geração de cerca de 7.600 empregos e o acréscimo de cerca de USD 8,5 bilhões (11 bilhões de dólares australianos) por ano ao PIB australiano até 2050.

Devido à similaridade geográfica e climática de algumas regiões do país, a Austrália pode servir como um potencial exemplo (*benchmark*) de planejamento estratégico sólido para o desenvolvimento de uma economia hidrogênio para o Brasil e outros países do eixo sul.

2.8 Chile

O Chile desponta como um dos países com maior potencial de produção e exportação de hidrogênio verde do mundo. De acordo com o Ministério de Energia do Chile, até 2050 será possível uma redução de até 20% nas emissões de CO₂ no país por meio do hidrogênio verde de baixo custo. A IEA estima que o Chile seja capaz de produzir 160 milhões de toneladas de hidrogênio verde por ano e de acordo com as projeções da Bloomberg, o preço do hidrogênio verde produzido no país será competitivo com diesel em menos de 10 anos.

O país sul-americano divulgou sua estratégia nacional para o hidrogênio (*"Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde"*) em novembro de 2020. Diferentemente de outras estratégias nacionais que consideram o hidrogênio azul (gerado a partir de gás natural com captura de CO₂), tais como a dos EUA e da Austrália, a estratégia chilena adota como premissa básica a produção de hidrogênio verde. Considerando os mais de 1.800 GW de potencial energético renovável, bem como a competitividade de preços de produção de hidrogênio renovável estimados em USD 0,8 a 1,1 por kg, o país oferece condições para desenvolver uma economia de hidrogênio integralmente renovável.

Nesse sentido, o governo chileno reconheceu a importância de um posicionamento tempestivo no mercado global de hidrogênio, afirmando que "um início tardio significaria renunciar a oportunidades" (*"Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde"*, p. 16, tradução própria). Assim, uma das ações concretas presentes na estratégia consiste no estabelecimento e aprofundamento de relações e contratos de longo prazo com os potenciais países importadores de hidrogênio verde, confirmando ao Chile uma parcela relevante no mercado global de fornecimento de hidrogênio verde nos próximos anos. Dessa forma, o plano de ação chileno para o hidrogênio é dividido em três etapas, conforme apresentado a seguir.

A primeira etapa, durante os anos de 2020 a 2025, consiste na ativação da indústria doméstica para o hidrogênio verde e no desenvolvimento da atividade de exportação. Uma indústria local será iniciada através de esforços governamentais e regulamentação para incentivar a produção bem como a promoção da demanda por esse elemento limpo e seus derivados. O foco será nas aplicações que estão mais próximas do mercado e/ou que apresentem uma demanda estabelecida, concentrada e de grande escala.

Estão contemplados como aplicações prioritárias o uso do hidrogênio verde em refinarias, caminhões utilizados na atividade de mineração, ônibus com elevada autonomia, produção de amônia e injeção de até 20% na rede de gás.

A segunda e terceira etapas da estratégia, planejadas respectivamente para os anos de 2025 a 2030 e adiante, consistem na escalada da produção e fornecimento de hidrogênio verde para o mercado internacional. Nesse sentido, a estratégia prevê a exploração de sinergias bem como de economias de escala para a exportação de amônia verde e hidrogênio verde (incluindo metanol e combustíveis sintéticos), revelando um mercado de exportações de USD 2,5 bilhões já em 2030 e de USD 24 bilhões em 2050.

Ratificando a estratégia chilena de estabelecer parcerias internacionais para o desenvolvimento de uma economia de hidrogênio verde, em dezembro de 2020 o Ministro de Economia e Energia alemão, Sr. Peter Altmaier, anunciou a decisão de financiamento (*Förderbescheid*) no montante de EUR 8,23 milhões para o projeto PtX denominado *"Haru Oni"* na região sul do Chile (GERMANY, 2020). Trata-se de uma iniciativa pioneira, uma vez que se refere ao primeiro financiamento em escala internacional no contexto Estratégia Nacional para o Hidrogênio Alemão, na qual serão empregadas primordialmente tecnologias *"Made in Germany"*.

O *"Haru Oni"* consiste na construção de uma planta comercial integrada para a produção em escala industrial de um combustível de neutralidade climática (e-fuel), a partir da combinação de hidrogênio produzido a partir da energia eólica e CO₂ capturado do ar. O projeto conta com a participação de vários parceiros internacionais. As principais empresas alemãs envolvidas são a Siemens Energy no desenvolvimento e implementação da planta e a montadora Porsche AG como consumidor para o combustível sintético (SIEMENS ENERGY, 2020).

Da mesma forma que referenciado para a Austrália, o Chile pode servir como um potencial *benchmark* de planejamento estratégico sólido para o desenvolvimento de uma economia hidrogênio para o Brasil e outros países do eixo sul.

2.9 Coreia do Sul

De forma pioneira, em junho de 2018, o Ministério do Comércio, Indústria e Energia (MOTIE) sul coreano anunciou um orçamento de cerca de USD 22 bilhões (2,6 trilhões de won sul-coreanos) para o estabelecimento de um ecossistema público-privado da indústria de veículos com tecnologias em hidrogênio até 2022. Em continuidade ao anúncio, em 2019 o governo lançou o “Roadmap da Economia do Hidrogênio da Coreia” e o “Roadmap Nacional do Desenvolvimento da Tecnologia do Hidrogênio”, estabelecendo metas de longo prazo até 2040. Em janeiro de 2020, a Assembleia Nacional da Coreia do Sul aprovou a “Lei do Hidrogênio - Promoção da Economia do Hidrogênio” e a “Lei de Gestão de Segurança do Hidrogênio”, estabelecendo a base legal para o apoio do governo ao desenvolvimento de uma economia de hidrogênio com atenção às normas de segurança das instalações (KAN, 2020).

Uma característica da estratégia sul-coreana para o hidrogênio é o foco na liderança internacional em veículos movidos a pilha a combustível e sistemas estacionários em grande escala para geração de energia. De acordo com o “Roadmap da Economia do Hidrogênio da Coreia”, o governo pretende atingir a produção de 6,2 milhões de veículos equipados a pilha a combustível (FCEVs - *Fuel Cell equipped vehicle*) até 2040, sendo 2,9 milhões de unidades para o mercado interno e 3,3 milhões para exportação. No momento, a prioridade do governo consiste no desenvolvimento de um mercado doméstico para o hidrogênio produzido no país.

Para o setor de transportes, a meta consiste na substituição de 40 mil ônibus e 80 mil táxis e na implementação de 30 mil caminhões movidos a pilha a combustível de hidrogênio até 2040. Além disso, estão previstas até 2040 a instalação de 1.200 estações de abastecimento bem como 10,1 GW para a aplicação de pilha a combustível estacionárias em edifícios³⁴. A meta para a geração de energia com pilha a combustível é de 15 GW até 2040, incluindo 7 GW para exportação. O roteiro também define uma meta de 2,1 GW até 2040 para a aplicação de pilha a combustível estacionárias em edifícios.

Em dezembro de 2020 foi inaugurada a usina de geração de energia a partir de pilhas a combustível de hidrogênio “Daesan Green Energy Power Plant”. De forma pioneira no mundo, essa usina possui capacidade de geração de 400 GWh a partir de 25 mil toneladas de hidrogênio. O hidrogênio é oriundo do complexo petroquímico de Daesan, Coreia do Sul, um dos três maiores do país. Embora o hidrogênio não seja de origem renovável, o processo de geração de energia (eletricidade e calor) é realizado por meio de reações do oxigênio e eletroquímicas sem emissões de GEE. Adicionalmente, a planta possui filtros de captura de partículas ultra finas (*ultra-fine dust*), possibilitando a purificação do ar (FUEL CELLS WORKS, 2020). A tecnologia das pilhas a combustível foi fornecida pela empresa sul-coreana Doosan Fuel Cell Co. Ltd., presente majoritariamente nos mercados norte-americano, sul-coreano e britânico com 440kW instalados e em construção de pilhas a combustível estacionárias³⁵.

³⁴ <https://www.iphe.net/republic-of-korea>. Acesso em 04.02.2021.

³⁵ <https://www.doosanfuelcell.com/en/intro/intr-0401/>. Acesso em 03.02.2021.

2.10 Arábia Saudita

Países como Arábia Saudita, cuja atual economia ainda é majoritariamente baseada na exploração de petróleo e gás, também deram início aos investimentos na economia de hidrogênio verde. Em 2019 o governo saudita publicou o documento “*Vision 2030*”, no qual estabeleceu-se a meta de 27,3 GW de energias renováveis em 2023 e 57,8 GW em 2030. Recentemente, o ministro de energia saudita, Príncipe Abdulaziz bin Salman, anunciou em uma coletiva de imprensa da conferência “*Future Investment Initiative*” que o país pretende se tornar “uma outra Alemanha no que concerne às energias renováveis”³⁶, tornando o país pioneiro na transição energética da região.

Diferentemente dos demais países e regiões apresentadas no presente capítulo, até o momento não pôde ser verificada a existência de uma estratégia nacional ou *roadmap* saudita para o hidrogênio. No entanto, a Arábia Saudita receberá um dos maiores projetos em hidrogênio verde anunciados, o qual será descrito a seguir.

O “Projeto Neom” consiste na construção de uma nova megacidade perto das fronteiras da Arábia Saudita com o Egito e a Jordânia 100% livre de carbono. A partir do desenvolvimento da base tecnológica e de mão de obra qualificada, almeja-se promover a diversificação a economia saudita no médio e longo prazo (TIMES OF INDIA, 2021). O projeto prevê a implementação de uma usina de hidrogênio verde de grande escala, para a qual estima-se a necessidade de integração de mais de 4 gigawatts de energia eólica e solar, e investimentos de USD 5 bilhões. De acordo com participante Air Products, empresa de gases industriais norte-americana com presença global, a instalação produzirá 650 toneladas de hidrogênio verde diariamente com eletrolisadores de tecnologia da alemã Thyssenkrupp Technology, quantidade suficiente para operar cerca de 20 mil ônibus movidos a pilha a combustível. O hidrogênio verde produzido nessa planta será exportado na forma de amônia verde (E-amônia) para os mercados globais, sendo reconvertido em hidrogênio para consumo final. A tecnologia para conversão do hidrogênio em amônia virá da dinamarquesa Haldor Topsøe e a produção está prevista para iniciar em 2025³⁷.

³⁶ <https://gulfbusiness.com/saudi-arabia-aims-to-become-next-germany-of-renewable-energy/>. Acesso em 04.02.2021.

³⁷ <https://www.airproducts.com/news-center/2020/07/0707-air-products-agreement-for-green-ammonia-production-facility-for-export-to-hydrogen-market>. Acesso em 12.11.2020.

2.11 China

A China é o maior produtor e consumidor de hidrogênio do mundo. Atualmente já estão em circulação no país 1.200 caminhões, 2.800 ônibus e 50 carros movidos a pilha a combustível de hidrogênio (IPHE, 2021). O país vem desenvolvendo pilhas a combustível de hidrogênio para uso em veículos rodoviários há cerca de 20 anos, tanto por empresas nacionais (a exemplo da SinoHytec) como em cooperações internacionais (SinoSynergy/Ballard, SinoHytec/Hydrogenics) como estratégia para redução de poluentes e a promoção da qualidade do ar nas áreas metropolitanas (WORLD ENERGY COUNCIL, 2020). Recentemente, o incremento no mercado chinês dos denominados NEVs (sigla em inglês para *new energy vehicles* ou “veículos movidos a novas energias”; tradução própria) foi incentivado pelo governo chinês a partir do lançamento em 2015 do “Mapa Tecnológico 2025” (também conhecido como “*Made in China 2025*”), no qual foi traçado um plano estratégico para a transformação da manufatura do país, até então caracteristicamente intensiva em trabalho e em tecnologia. Nesse sentido, as principais tecnologias mapeadas a serem desenvolvidas em um horizonte de dez anos, em diversos setores da economia, são: inteligência artificial, internet das coisas, *machine learning*, eficiência energética e veículos elétricos, entre outras (XINHUA, 2017).

Para os veículos elétricos o governo chinês lançou em 2016 um *roadmap* tecnológico para veículos movidos a pilha a combustível de hidrogênio (“Hydrogen Fuel Cell Vehicle Technology Roadmap”). Nesse documento a tecnologia de pilha a combustível é apresentada como uma alternativa complementar às baterias no desenvolvimento dos veículos elétricos, de modo a contribuir para a segurança energética chinesa e o transporte de baixa emissão. Além disso, são apresentados no documento um panorama do estágio de desenvolvimento da tecnologia assim como dos requisitos de inovação tecnológica (pesquisa, tecnologias aplicadas, demonstração e comercialização) a serem explorados no país.

O foco do *roadmap* está principalmente nas aplicações de transporte (rodoviário, ferroviário e marítimo), na geração de energia a partir de células a combustível e na infraestrutura de produção, fornecimento e reabastecimento de hidrogênio, incluindo segurança, testes, certificação e estações de reabastecimento. Nesse sentido, é válido ressaltar que a China planeja ter em 2030 uma estrutura de 3.000 km de dutos dedicados para o transporte do hidrogênio (WORLD ENERGY COUNCIL, 2020).

Pelo Acordo de Paris, a China se comprometeu a cessar o crescimento das emissões de CO₂ até 2030 bem como aumentar a participação das fontes renováveis na matriz energética em um percentual de 20%. Em setembro de 2020 o governo chinês ratificou o comprometimento com a descarbonização da economia do país, anunciando que o crescimento das emissões de CO₂ será interrompido antes mesmo de 2030 e que o país visa atingir a neutralidade de carbono (*carbon neutrality*) antes de 2060 (CLIMATE ACTION TAKER, 2020).

Assim, de modo a cumprir tais ambiciosas metas, em uma economia que ainda é altamente dependente de fontes fósseis, a país pretende focar cada vez mais no hidrogênio de origem sustentável (verde), com foco na integração dos setores de geração de energia e mobilidade. O governo chinês prevê inicialmente o desenvolvimento de *clusters* e regiões de hidrogênio verde de modo a promover o desenvolvimento dessa tecnologia. Nesse sentido, algumas instalações eólicas *offshore* em desenvolvimento serão exclusivamente dedicadas à produção de hidrogênio, não sendo sequer conectadas à rede de transmissão nacional.

Além disso, o governo chinês prevê a construção de 5.000 estações de reabastecimento de hidrogênio até 2035 e para os Jogos Olímpicos de Inverno em 2022 um total de 1.500 ônibus e diversos carros movidos a pilha a combustível de hidrogênio farão a rota Beijing e Zhangjiakou (WORLD ENERGY COUNCIL, 2020).

3. Hidrogênio no Brasil

No presente capítulo são apresentados os principais atores na produção e consumo do gás, volumes de produção e consumo bem como aplicações atuais do hidrogênio no Brasil. Na sequência sintetiza-se as principais políticas públicas e ações no campo da pesquisa, desenvolvimento e demonstração já realizadas no país para o desenvolvimento das rotas tecnológicas de hidrogênio.

Em se tratando especificamente de hidrogênio verde, são apresentados exemplos de projetos com distintas aplicações bem como uma análise sobre os potenciais de produção a partir de fontes alternativas de energia para consumo interno e exportação. Para exemplificar o potencial para o hidrogênio verde no país é apresentado um estudo de caso sobre a indústria de fertilizantes nitrogenados com possível utilização da amônia verde. Por fim, o capítulo apresenta o mapeamento da indústria e dos principais atores acadêmicos e institucionais na temática de hidrogênio no Brasil.

3.1 O mercado atual de hidrogênio

Da mesma forma que em outras regiões do globo, atualmente a aplicação do hidrogênio no Brasil se dá apenas na síntese de diversos produtos e em processos industriais (óleo bruto, agentes redutores, hidrogenação de gordura e hidrocarbonetos, entre outros conforme apresentado no Item 1.4). A utilização do hidrogênio verde como fonte direta de energia ou vetor energético no país encontra-se restrito uma escala experimental em alguns projetos pilotos e de P&D, os quais serão apresentados nos Itens 3.3 e 3.4.

A Figura 8 apresenta os dados totais de produção de hidrogênio no Brasil ao longo dos anos 2015, 2016, 2017 e 2018. Nesse sentido, a Petrobras responde por cerca 95% da produção total do país, como pode ser verificado na Figura 8 para as aplicações “refino” e “fertilizantes”.

Ressalta-se que a Petrobras é um autoprodutor, ou seja, sua produção de hidrogênio é destinada ao consumo próprio para uso no processo de produção de outros derivados do petróleo, e, portanto, não circula na cadeia de valor do setor no Brasil. Desconhece-se a existência da atividade da indústria *merchant*, ou seja, fornecedora de gás hidrogênio *on site* ou *off site* para refinarias no Brasil, como acontece nos EUA (EPE, 2021, p. 4).

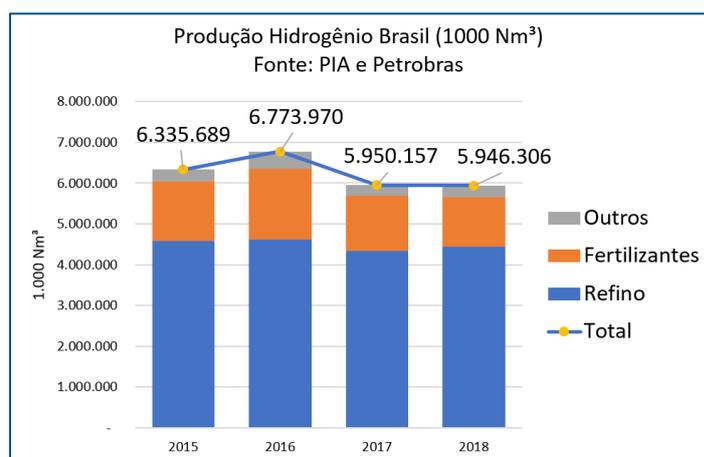


Figura 8 – Produção anual de H₂ no Brasil. Fonte: IBGE, Petrobras. Elaboração própria.

A Figura 9 apresenta a produção de hidrogênio cinza em normal metro cúbico por ano (Nm³/ano) no sistema Petrobras. Pode-se aferir que a produção de hidrogênio cinza nos últimos cinco anos permaneceu estável a uma média próxima das 5.500 Nm³/ano (aprox. 400.000 t/ano). Cabe destacar que tal produção se dá majoritariamente através do processo de reforma a vapor de gás natural (*Steam Methan Reforming, SMR*), opcionalmente utilizando nafta e reforma catalítica (RC). A finalidade do hidrogênio na cadeia de produção é a sua utilização nos processos de hidrotreatamento de gasolina, diesel e lubrificantes, visando a adequação da qualidade desses produtos. Conforme informado por meio de consulta à instituição, até o ano 2019 havia o uso de hidrogênio para a produção de fertilizantes, o que se encerrou com o processo de hibernação e arrendamento das unidades. Por meio dos dados de produção demonstrados na Figura 9, é possível aferir que a aplicação do hidrogênio nas unidades de fertilizantes no ano de 2019 já foi significativamente menor do que nos anos anteriores, indicando para uma queda crescente na produção de amônia para fertilizantes nitrogenados³⁸.

³⁸ Dados obtidos mediante consulta ao Centro de Pesquisas e Desenvolvimento Leopoldo A. Miguel de Mello (CENPES) da Petrobras. Processo N° 48360.000218/2020-53 – Ofício CENPES 0007/2020.

Em relação aos locais de produção, pode-se afirmar que a produção de hidrogênio cinza pela Petrobras se dá de forma bem distribuída por todo o país em suas refinarias. A Figura 10 apresenta a localização dos parques de refino no Brasil para a Petrobras e demais atores. De acordo com MENDES et al. (2018), as refinarias da Petrobras, que representam ainda cerca de 98% da capacidade de refino total no país, foram construídas com grande escala de produção, tanto para minimizar os custos de abastecimento quanto para assistir regiões específicas do território nacional. Dessa forma, percebe-se uma distribuição do parque de refino nacional nas proximidades dos centros econômicos. No Sudeste, estão instalados 56% da capacidade de refino; no Nordeste, 23% e, no Sul, 19%.

É importante destacar que como parte do plano de desinvestimentos da Petrobras em andamento, que contempla a venda de oito refinarias, o monopólio atual das refinarias (atualmente 98% das refinarias no país pertencem à Petrobras³⁹) tende a ser diluído entre outros atores privados. É válido acompanhar quais os possíveis impactos na produção nacional de hidrogênio cinza em decorrência de tais desinvestimentos.

A parcela remanescente da produção nacional de hidrogênio, equivalente a 5%, são produzidos pelas indústrias de gases industriais. Os últimos dados sobre a produção e consumo de hidrogênio para fins comerciais no Brasil, ou seja, exceto os volumes de produção da Petrobras, referem-se ao ano de 2018, na qual 72 unidades produtivas foram consultadas. Nesse ano, a produção de hidrogênio conferiu ao setor um volume de vendas total no valor de pouco mais de R\$ 282.250 milhões, conforme demonstrado na Figura 11, correspondendo a aproximadamente 6% das receitas totais da indústria de fabricação de gases. Foram comercializados aproximadamente 213 mil Nm³ do gás, conferindo um leve declínio quando comparado a anos anteriores. Apesar de consultas realizadas com alguns representantes do setor de gases industriais, não puderam ser apuradas as razões do declínio de produção de hidrogênio no Brasil a partir de 2016.

O fornecimento de hidrogênio como insumo para a indústria no Brasil é realizado majoritariamente por quatro empresas de gases industriais, apresentadas a seguir:

- **Linde:** Com faturamento total de USD 27 bilhões em 2020, a empresa é uma das empresas líderes mundiais na área de gases industriais e engenharia. A *Linde AG* foi fundada na Alemanha em 1879 e em outubro de 2018 fundiu-se com a norte-americana *Praxair*, resultando na empresa atual chamada *Linde plc*. No Brasil, o grupo tem sido representado desde então por sua subsidiária *White Martins*, com sede no Rio de Janeiro;

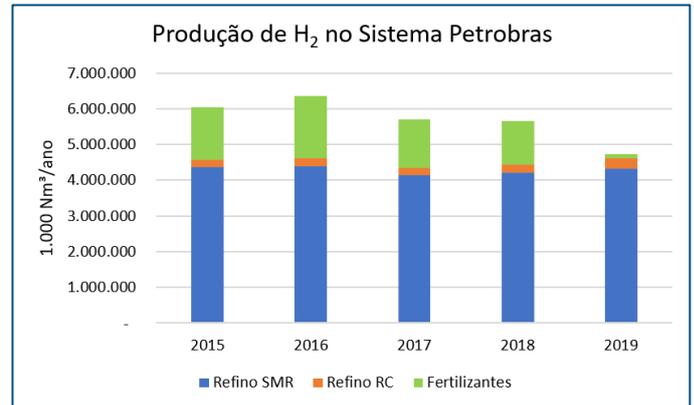


Figura 9 – Produção de H₂ na Petrobras. Fonte: Petrobras. Elaboração própria.



Figura 10 – Localização dos parques de refino no Brasil. Fonte: Mendes et al. (2018).

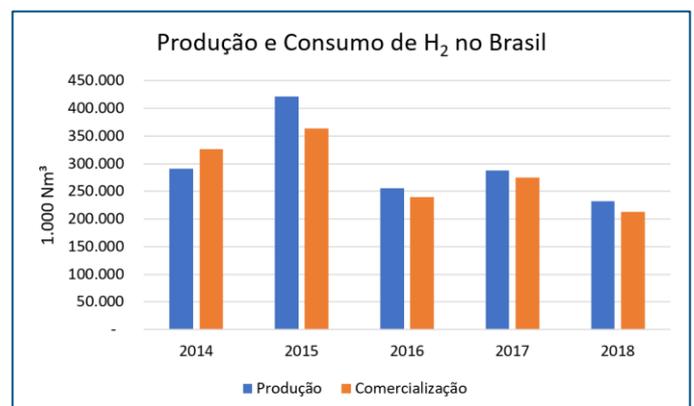


Figura 11 – Geração e consumo de hidrogênio no Brasil 2014 - 2018. Fonte: PIA - Produto - IBGE (2020).

³⁹ <https://exame.com/negocios/com-venda-de-refinarias-pessao-para-petrobras-controlar-combustivel-pode-ser-menor/>

3. **Setor de alimentos** para a hidrogenação de produtos, principalmente margarinas;
4. **Setor de vidros planos** para o processo de inertização do banho de estanho de forma a impedir a formação de defeitos no vidro e proteger as câmaras/equipamentos nos quais o vidro é conformado;
5. **Setor de geração de energia** (termelétricas) para refrigeração de turbinas.

Ressalta-se que a partir das entrevistas realizadas não puderam ser aferidos os percentuais de participação de cada setor no consumo do hidrogênio nacional, com a exceção do setor petroquímico, conforme já mencionado no presente capítulo.

É notável que a produção de amônia, responsável pelo segundo maior consumo de hidrogênio no âmbito global, não consta nesta na listagem acima de principais setores, apesar de o Brasil configurar como quarto maior consumidor de fertilizantes no mundo. O Item 3.5.1 do presente capítulo irá tratar detalhadamente essa temática.

Em relação às rotas de distribuição, o hidrogênio no país é transportado de forma comprimida a 220, 350 ou 700 bar exclusivamente via modal rodoviário. Todos os entrevistados apontaram para os elevados custos para o transporte do gás no Brasil, ultrapassando muitas vezes os próprios custos de produção. No entanto, não puderam ser obtidas as faixas de custos de produção tampouco de distribuição do gás até o consumidor final. A título de exemplificação, foi relatado que o de abastecimento de hidrogênio para uma usina termelétrica em Manaus é realizado via transporte rodoviário em carretas com origem em um plantas de produção de hidrogênio na Bahia e no Ceará, configurando mais de 4.000 km de distância entre o fornecedor e consumidor.

Não obstante, foi afirmado de forma recorrente que a tecnologia de liquefação do hidrogênio seria a mais indicada para as longas distâncias via transporte rodoviário no Brasil, a exemplo de como é a prática nos EUA e em países da União Europeia. Tal tecnologia, na qual o hidrogênio é liquefeito por meio de redução de temperatura a $-252\text{ }^{\circ}\text{C}$, não é empregada na distribuição do gás no Brasil por apresentar elevados custos iniciais e ser economicamente viável apenas quando realizada em larga escala. Alternativamente poderia considerar-se a construção/readequação da malha de gasodutos para o transporte de hidrogênio. Dessa forma, constata-se que o mercado brasileiro de hidrogênio para fins industriais ainda carece de ganho de escala.

Com o potencial de desenvolvimento de um mercado de hidrogênio verde ou de forma transitória azul com CCS, outros setores da indústria brasileira apontados pelos entrevistados tais como a indústria química, siderúrgica, residencial, mineração e cimento, bem como o setor de transportes, poderiam impulsionar esse ganho de escala da indústria de hidrogênio sustentável brasileira. Cabe ressaltar que, por se tratarem de empresas multinacionais, todas as empresas entrevistadas confirmaram a presença do hidrogênio verde em seus planejamentos estratégicos e planos de negócios. Da mesma forma, tais empresas apresentam em escala mundial um portfólio em constante crescimento de projetos pilotos e comerciais para o fornecimento de hidrogênio verde.

3.2 Panorama das políticas públicas

Após explanação sobre o mercado atual de hidrogênio no país, cabe a seguir relacionar as principais ações institucionais e governamentais realizadas até o presente para o desenvolvimento das tecnologias de hidrogênio no Brasil.

O “Programa de Ciência, Tecnologia e Inovação para a Economia de Hidrogênio” (ProH2, inicialmente denominado PROCAC) e o “Roteiro para a Estruturação da Economia do Hidrogênio no Brasil” podem ser consideradas políticas públicas de grande relevância no início dos anos 2000 para apresentação de ações concretas para o desenvolvimento das tecnologias de hidrogênio no Brasil. O ProH2 do Ministério de Ciência e Tecnologia teve como principal objetivo apresentar as bases para a viabilidade técnica do hidrogênio no país, a partir do fomento de ações em pesquisa e desenvolvimento bem como da criação de normas técnicas para a economia de hidrogênio. Já o “Roteiro para a Estruturação da Economia do Hidrogênio no Brasil” do Ministério de Minas e Energia (MME) estabeleceu de forma detalhada premissas para o desenvolvimento de uma estratégia nacional, como a diversificação da matriz energética com crescente participação de fontes renováveis, a redução da dependência externa de combustíveis fósseis e o desenvolvimento da indústria nacional no desenvolvimento da nova tecnologia. Nesse sentido, o foco inicial estava na geração de hidrogênio a partir do gás natural, pelo menos até 2015, e posteriormente uma substituição por fontes renováveis com ênfase na utilização do etanol.

Em continuidade às políticas públicas brasileiras voltadas para o hidrogênio, o documento “Hidrogênio Energético no Brasil - Subsídios para políticas de competitividade: 2010-2025”, elaborado em 2010 pelo Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE), organização social supervisionada pelo

MCTIC (Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações, atual MCTI), apresentou subsídios para a definição de ações político-institucionais em prol do desenvolvimento de uma economia de hidrogênio através de recomendações concretas nas seguintes frentes de atuação:

- Recomendações gerais para o incentivo à economia do hidrogênio;
- Recomendações para o incentivo à produção do hidrogênio;
- Recomendações para o incentivo ao desenvolvimento da logística do hidrogênio;
- Recomendações para o incentivo aos sistemas de utilização do hidrogênio.

Da mesma forma, a “Agenda Estratégica de CT&I no Setor Elétrico Brasileiro” (CGEE, 2017) atualiza as recomendações propostas em 2010, trazendo um detalhamento maior para as recomendações hidrogênio, a partir do ganho de maturidade dessa tecnologia no mundo. (CGEE, 2017, p. 156-166). Assim, são apresentadas de forma detalhada no documento metas e ações de CT&I para a macro temática de hidrogênio e pilha a combustível nos campos regulatório, tecnológico e de inovação.

O “Plano de Ciência, Tecnologia e Inovação para Renováveis e Biocombustíveis em 2018-2022” inclui o hidrogênio como uma tecnologia alternativa para o setor de energias renováveis, apresentando recomendações para o fomento da pesquisa, do desenvolvimento tecnológico e da inovação nas cadeias produtivas de tal tecnologia, fortalecendo a competitividade e aumentando a diversificação da matriz energética de forma segura e eficiente.

Nesse sentido, o plano recomenda o uso do hidrogênio principalmente para uso veicular e estacionário para geração de energia e para a produção de combustíveis (MCTIC, 2018).

Entre 1999 e 2007 foram investidos no total cerca de R\$ 134 milhões, o que corresponde de 3% a 5% dos investimentos em hidrogênio no Japão, União Europeia ou EUA (GEEE, 2010). A crescente exploração das fontes de petróleo no Pré-Sal e a promessa de grande soma em royalties retirou de certa forma a atenção para o hidrogênio como uma alternativa energética sustentável para o Brasil (EPE, 2021).

Em 2020 o governo brasileiro retomou a pauta, entre outras ações por meio da inclusão do hidrogênio no capítulo de “Tecnologias Disruptivas” do Plano Nacional de Energia 2050 (MME/EPE, 2020a, p. 187-189) e ainda mais recentemente, por meio da nota técnica “Bases para a Consolidação da Estratégia Brasileira do Hidrogênio” (EPE, 2021). Conforme informado no último documento, há o intuito do governo brasileiro de consolidar uma estratégia nacional para o hidrogênio em forma de um plano de ação específico do governo federal nessa temática (EPE, 2021, p. 28). Também é válido ressaltar que o Brasil é em âmbito internacional membro do Parceria Internacional para a Economia do Hidrogênio (IPHE) desde sua fundação em 2003. Nesse sentido, o país colabora para organizar e efetivamente implementar a pesquisa internacional, o desenvolvimento, as atividades de utilização comercial e demonstração, relacionadas ao hidrogênio e a tecnologia das pilhas a combustível (CGEE, 2010). Inicialmente a representação na IPHE era realizada pelo MME e mais recentemente é exercida pelo Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. A Figura 13 resume as principais políticas públicas desenvolvidas até o momento com impacto direto e indireto no desenvolvimento da cadeia de produção de hidrogênio no Brasil.

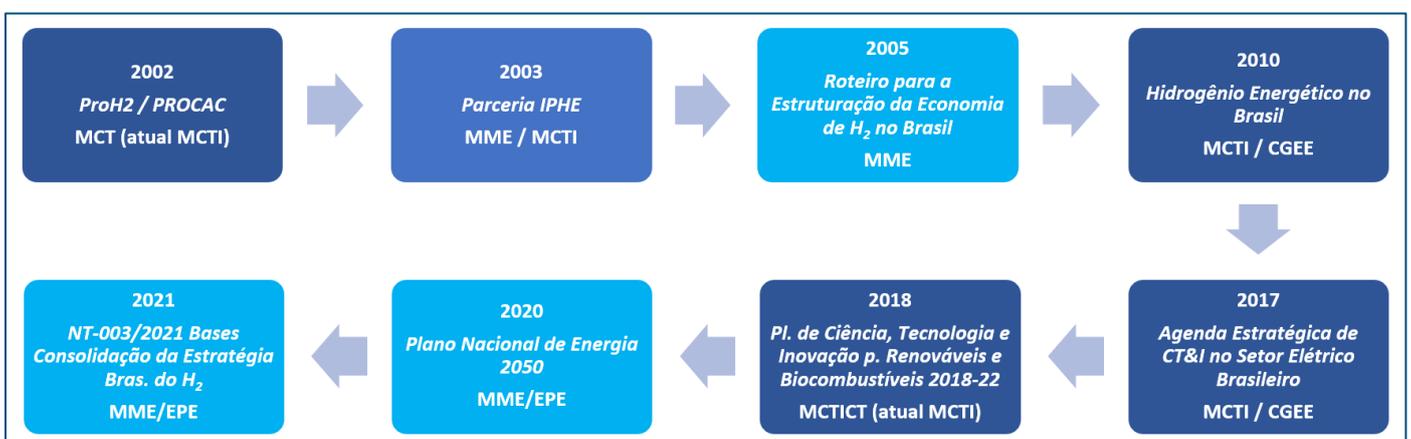


Figura 13 – Ações governamentais para o H₂ no Brasil. Fonte: Elaboração própria, com base nos documentos do MME, MCTIC e EPE.

Em relação à evolução da normatização no Brasil sobre as tecnologias de hidrogênio, a ABH2 (2020) informa sobre a existência de especificação técnica para pilhas a combustível publicada pela ABNT⁴⁰. Além disso, o Brasil é também membro observador do comitê técnico da ISO (*“International Organization for Standardization”*) denominado *“ISO/TC 197 Hydrogen Technology”* (Tecnologia de Hidrogênio) e vem acompanhando o desenvolvimento de diversas normas técnicas conforme apresentando no Anexo II do presente estudo (ABH2, 2020, p.5)⁴¹.

3.3 Pesquisa, desenvolvimento & demonstração

O Brasil é líder em Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação (PD&I) em tecnologias de hidrogênio na América Latina. Diversos grupos de pesquisa em universidades mantêm laboratórios de elevado padrão internacional para desenvolver tecnologias aplicáveis à realidade nacional. Destaca-se o Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, da Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE-UFRJ) com o Laboratório de Hidrogênio (LabH2), o qual dedica-se exclusivamente ao tema de energia do hidrogênio, desenvolvendo pilhas a combustível de óxido sólido e veículos pesados com tração elétrica, entre outros. Por iniciativa do LabH2 da Universidade Federal do Rio de Janeiro e contando com a colaboração de várias instituições de pesquisa e desenvolvimento, órgãos governamentais e empresas relacionadas ao tema, foi fundada em abril de 2017 a Associação Brasileira de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação do Hidrogênio (ABH2) que é uma associação sem fins lucrativos destinada à pesquisa do hidrogênio no Brasil⁴².

Já o Laboratório de Hidrogênio (LH2) da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP) dedica-se aos temas de **1)** produção de hidrogênio pelos processos de reforma de gás natural, etanol, e eletrólise da água e purificação de hidrogênio, **2)** aplicações do hidrogênio em projetos de geração distribuída de energia elétrica, utilizando pilhas a combustível e **3)** aplicações do hidrogênio em mobilidade, onde destaca-se a construção do primeiro veículo movido à hidrogênio e pilhas a combustível do tipo Membrana Polimérica Eletrolítica (PEM) do hemisfério sul.

Da mesma forma, o Núcleo de Pesquisa em Hidrogênio (NUPHI) do Parque Tecnológico Itaipu (PTI) foi criado como resultado de um convênio firmado com a Itaipu Binacional e a Eletrobras. A partir desse convênio, também foi implementada uma Planta Experimental de Produção de Hidrogênio, que possibilita a análise de todo o ciclo de obtenção e aplicação desse hidrogênio, envolvendo a produção, purificação, compressão, armazenamento e posterior utilização em células a combustível ou combustão em mistura com outros combustíveis, como, por exemplo, o biometano.

Por fim, destaca-se também o Grupo de Estudos do Setor Elétrico (GESEL) do Instituto de Economia da Universidade Federal do Rio de Janeiro (IE/UFRJ), o qual vem desenvolvendo pesquisas e estudos também sobre o tema de hidrogênio, com uma transversalidade centrada em inovações regulatórias. Outros grupos de pesquisa em destaque no tema de hidrogênio no cenário brasileiro são: Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares da Universidade de São Paulo (IPEN/USP), Laboratório de Materiais e Energias Renováveis (Labmater) da Universidade Federal do Paraná, Instituto Nacional de Tecnologia do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações, dentre outros.

De acordo com a EPE (2021), de 2013 a 2018 foram identificados 91 projetos associados a hidrogênio e pilhas a combustível com recursos totais na ordem de R\$ 34 milhões financiados pela ANEEL, ANP e/ou Fundo Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FNDCT). Na sequência, serão apresentados alguns exemplos de projetos de hidrogênio verde conduzidos nos últimos anos no Brasil.

Conforme informado no compêndio da ABH2 (2020, p.5), as regiões Sudeste e Nordeste encontram-se igualmente na primeira posição em número centros de P&D no Brasil, correspondendo a 34%, seguidos da região Sul (22%), Centro-Oeste (7%) e região Norte (3%). Além disso, 66% dos projetos desenvolvidos no Brasil possuem o tema de produção de hidrogênio, 13% de pilhas a combustível e 9% armazenamento.

⁴⁰ A ABNT possui uma Comissão de Estudo Especial de Tecnologias de Hidrogênio (ABNT/CEE 067) com participação da ABH2, cujo âmbito de atuação permeia a normatização no campo de tecnologia de hidrogênio, compreendendo sistemas e dispositivos para produção, armazenamento, transporte, medição e uso do hidrogênio, bem como pilhas a combustível de hidrogênio, no que concerne à terminologia, requisitos e métodos de ensaio. <http://www.abnt.org.br/cee-67>. Acesso em 02.03.2021.

⁴¹ Atualmente o Brasil pleiteia uma participação ativa com direito a voto nas atividades internacionais de normatização no campo de tecnologia de hidrogênio. <https://www.iso.org/committee/54560.html?view=participation>. Acesso em 02.03.2021.

⁴² Como um evento de maior destaque na cidade do Rio de Janeiro, a ABH2 coorganizou em junho de 2018 a 22ª Conferência Mundial de Energia do Hidrogênio (WHEC 2018), que contou com a presença de 784 representantes de 51 países e discutiu temas de grande relevância para o desenvolvimento das tecnologias de hidrogênio no mundo.

Em relação à distribuição setorial de empresas que atuam em projetos de hidrogênio, constata-se uma grande predominância de empresas do setor elétrico, com 69%, seguido de empresas do setor de gases (15%), do setor de transportes (9%) e, por fim, dos setores de pilhas a combustível (6%) e metais (1%). É notória também a predominância de projetos de hidrogênio no setor público, correspondendo a uma parcela de 68%.

Considerando o elevado percentual da participação do setor público nos projetos de P&D em hidrogênio, cabe destacar o papel do Programa de P&D da ANEEL como um dos principais instrumentos de desenvolvimento tecnológico do setor elétrico brasileiro. Criado em 2000 pela Lei 9.991/2000, o programam prevê que as empresas do setor de geração, transmissão e distribuição elétrica devem empregar anualmente um percentual mínimo (atualmente de 0,75%) de sua receita operacional líquida em projetos de pesquisa e desenvolvimento tecnológicos em benefício do setor elétrico, cabendo à ANEEL gerir e operacionalizar tal programa.

Anualmente, a ANEEL tem gerido em média R\$ 550 milhões em projetos de P&D dentro desse programa e os investimentos totais já ultrapassaram os R\$ 7,6 bilhões. Adicionalmente, os investimentos em P&D podem ser categorizados como projetos de chamada estratégica. De acordo com a ANEEL (2019) “temas ou subtemas estratégicos são aqueles cujo desenvolvimento é de interesse nacional e de grande relevância para o setor elétrico, envolvendo elevada complexidade em termos científicos e/ou tecnológicos e baixa atratividade para investimento como estratégia empresarial isolada ou individual. Além disso, necessitam esforços conjuntos e coordenados de várias empresas e entidades executoras e grande aporte de recursos financeiros”.

Nesse sentido, desde o ano de 2011 até o momento, a ANEEL realizou duas chamadas de P&D Estratégico cujas abrangências de escopo envolvem o tema hidrogênio, conforme a seguir:

- Chamada de Projeto de P&D Estratégico nº 021/2016: “Arranjos Técnicos e Comerciais para a Inserção de Sistemas de Armazenamento de Energia no Setor Elétrico Brasileiro”. Visando a promoção da área de armazenamento de energia a ANEEL realizou em 2016 uma chamada pública de projetos que atendam a essa temática. O principal objetivo da chamada foi a proposição de arranjos técnicos e comerciais para avaliação e inserção de sistemas de armazenamento de energia no setor elétrico brasileiro, de forma integrada e sustentável, buscando também criar condições para o desenvolvimento de base tecnológica e infraestrutura de produção nacional (ANEEL, 2016);
- Chamada de Projeto de P&D Estratégico nº 022/2018: “Desenvolvimento de Soluções em Mobilidade Elétrica Eficiente”. Com o intuito de promover o desenvolvimento de soluções para uma mobilidade elétrica eficiente no país, a ANEEL realizou em 2018 uma chamada publica de projetos que para gerar negócios futuros que contribuam para a criação de massa crítica e base tecnológica para o desenvolvimento de produtos e serviços nacionais nessa área. A chamada contemplou soluções para mobilidade elétrica tais como modelos de negócio, equipamentos, tecnologias, serviços, sistemas e infraestruturas para suporte ao desenvolvimento e à operação dos veículos elétricos ou híbridos *plug-in*, a bateria ou célula combustível, incluindo o hidrogênio (ANEEL, 2019).

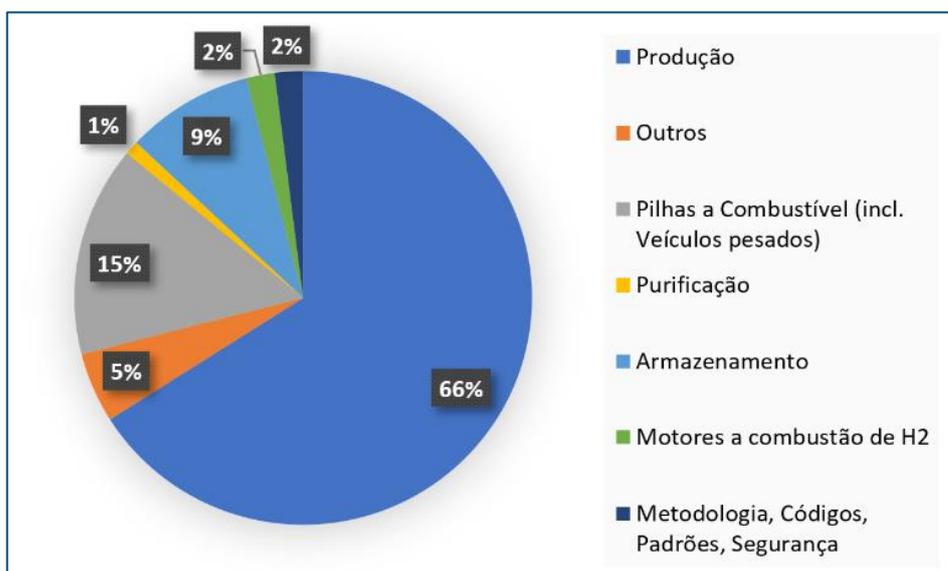


Figura 14 – Segmentação de projetos de P&D em H₂ no Brasil por temas. Fonte: ABH2. Elaboração própria.

3.4 Projetos nacionais em hidrogênio verde

A seguir serão detalhados alguns projetos relacionados a soluções em tecnologias de hidrogênio realizados no Brasil, tanto no contexto do Programa de P&D da ANEEL quanto de origens de financiamento distintas. Não é pretensão do presente estudo a apresentação de listagem completa de todos os projetos já realizados no país, mas sim trazer exemplos relevantes de projetos em diferentes níveis de desenvolvimento e aplicações.

Projeto Ônibus à Célula a Combustível a Hidrogênio para Transporte Urbano no Brasil

Em 15 de junho de 2015, o Brasil tornou-se o primeiro país da América Latina a possuir três ônibus híbridos movidos a pilha a combustível e uma estação de produção, armazenamento e abastecimento de hidrogênio operando no transporte urbano de passageiros.

O Projeto teve início na Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e o Desenvolvimento (Eco-92) no Rio de Janeiro. Em novembro de 2000 o *Global Environment Facilities* (GEF)⁴³ decidiu financiar 5 projetos de demonstração de ônibus a pilha a combustível nos seguintes países em desenvolvimento: Brasil, México, Egito, Índia e China. Apenas o Brasil e a China atingiram a fase de implementação de seus respectivos projetos. Nesse sentido, além do *Global Environment Facilities* (GEF) supracitado, também compuseram o grupo de parceiros do projeto a Empresa Metropolitana de Transportes Urbanos de São Paulo (EMTU), a Financiadora de Estudos e Projetos do Ministério de Ciência e Tecnologia (Finep), o Ministério de Minas e Energia (MME), e o Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD).



Figura 15 – Protótipo de ônibus a H₂ COPPE/UFRJ. Fonte: COPPE/UFRJ (2010).

No Brasil foi adotada a premissa de envolvimento da indústria nacional desde a fase inicial do projeto bem como uma estratégia de subdivisão do projeto em fases para redução dos potenciais riscos tecnológicos e econômicos, conforme a seguir: Fase I: Estudo de Viabilidade; Fase II: projeto de demonstração, o qual foi dividido nas Fases II.2 e II.3.; A Fase II.2 teve início em maio de 2006 com a assinatura do contrato entre o consórcio e o PNUD para a construção e testes de um ônibus protótipo e a construção, instalação e operação de uma estação de hidrogênio; já a Fase II.3 teve início em janeiro de 2012 para a construção, testes e operação em transporte urbano de passageiros de 3 novos ônibus e a operação contínua da estação de hidrogênio. Por fim, as Fases III e IV foram planejadas nos documentos do projeto para motivar a produção em larga escala.

Um consórcio formado por quatro membros brasileiros e quatro internacionais implementou o projeto “Ônibus a combustível a hidrogênio para transporte urbano no Brasil”, financiado pelo GEF, conforme listado a seguir:

- Ballard Power Systems (Vancouver - Canada);
- EPRI International (Palo Alto – Estados Unidos);
- Hydrogenics (Mississauga - Canadá);
- Marcopolo (Caxias do Sul - Brasil);
- BR Petrobras (Rio de Janeiro - Brasil);
- Tuttotrasporti (Caxias do Sul - Brasil) na Fase II.3;
- NuCellsys GmbH (Nabern – Alemanha) na Fase II.2;
- AES Eletropaulo (São Paulo – Brasil) na Fase II.2.



Figura 16 – Ônibus movido a pilha a combustível a H₂ para transporte urbano. Fonte: Mônica Saraiva Panik.

⁴³ O GEF é uma instituição financeira independente criado às vésperas da Eco-92 que provê financiamentos para projetos países em desenvolvimento para temas climáticos e ambientais. Mais informações podem ser consultadas em <https://www.thegef.org/>. Acesso em 02 de janeiro de 2021.

A formação de tal consórcio teve como principais objetivos a engenharia, produção, operação e avaliação de ônibus urbanos movidos a pilha a combustível bem como de estações de abastecimento de hidrogênio, combinando características favoráveis de operação com quesitos de segurança, alta eficiência, emissão zero e perspectivas de atingir custos competitivos.

O projeto combinou a alta tecnologia e a experiência de empresas líderes no mercado global em suas respectivas áreas de atuação, com a excelência da engenharia da indústria brasileira. Nesse sentido, o projeto possibilitou uma nova geração de ônibus a pilha a combustível, desenvolvida usando chassis, carroceria e componentes produzidos no Brasil. O envolvimento da indústria nacional e a nacionalização de componentes criou uma base sustentável para o desenvolvimento, produção e operação de ônibus a pilha a combustível e da estação de hidrogênio no Brasil atingindo o menor custo deste tipo de ônibus no mercado internacional por vias da nacionalização de 65% dos componentes. O projeto não teve continuidade devido à finalização do contrato global de financiamento.

Projeto Hidrogênio da FURNAS Centrais Elétricas S/A: Desenvolvimento de Sinergia entre as fontes hidrelétrica e solar com armazenamento de energias sazonais e intermitentes em sistemas de hidrogênio e eletroquímico – SHSBH2

FURNAS está desenvolvendo na UHE Itumbiara, localizada na divisa dos estados de Goiás com Minas Gerais uma “Plataforma de Desenvolvimento e Demonstração de Tecnologias do Hidrogênio” (PD-H2). O projeto de pesquisa visa atender à Chamada nº 21/2016 da Agência Nacional de Energia Elétrica de Projeto Estratégico – Arranjos Técnicos e Comerciais para inserção de Sistemas de Armazenamento de Energia no Setor Elétrico Brasileiro e o investimento previsto é de cerca de R\$ 44,6 milhões, com previsão de conclusão em junho de 2021⁴⁴.

Os principais parceiros de FURNAS nesse projeto são: a empresa Base-Energia Sustentável, a Universidade Estadual Paulista (Unesp), a Universidade de Campinas (Unicamp), o Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial (Senai) e a empresa PV Solar, especializada na implantação de usinas fotovoltaicas flutuantes. O projeto conta ainda com uma parceria internacional com a Universidade de Brandemburgo (Alemanha), instituição acadêmica com experiência no armazenamento de hidrogênio.

A PD-H2 tem como principal conceito o desenvolvimento de um sistema formado por diversas tecnologias de geração e cogeração de energia, incluindo a energia solar fotovoltaica com a instalação de painéis no entorno e no reservatório, de armazenamento energético via hidrogênio, e de interações com a área de mobilidade elétrica, podendo incluir ainda aplicações não energéticas do hidrogênio disponibilizado a partir do processo de eletrólise.

A energia solar gerada na UHE Itumbiara totalizará 1000 kWp (quilowatts pico), dos quais 200 kWp serão provenientes das placas localizadas no reservatório da usina que serão interligados aos 800 kWp das demais placas instaladas em solo. A produção não será comercializada; se destinará ao Sistema de Serviços Auxiliares da unidade, como iluminação, tomadas e ventilação, entre outros. O projeto também objetiva o desenvolvimento de formação de recursos humanos para nacionalização do eletrolisador alcalino e da célula a combustível, visando o desenvolvimento de fabricantes nacionais, potencializando a entrada dessas tecnologias com soberania e segurança, entre outros equipamentos utilizados na Plataforma proposta. (FURNAS, 2021).

Projeto Armazenamento de Energia da Companhia Energética de São Paulo -CESP

A Companhia de Transmissão de Energia Elétrica Paulista (CESP), controlada desde 2018 pelo Grupo Votorantim e pelo *Canada Pension Plan Investment Board*, vem desenvolvendo na usina hidrelétrica Engenheiro Sergio Mota / Porto Primavera (UHE) um complexo de energias renováveis alternativas (usinas solares, eólica e sistemas de armazenamento de energia), que fazem parte de projetos de [Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação \(PD&I\)](#) desenvolvidos pela companhia.

Localizada às margens do Rio Paraná na fronteira entre os estados de São Paulo e Mato Grosso do Sul, a UHE, de potência fiscalizada de 1.540 MW, iniciou em 2017 o desenvolvimento do projeto “Análise da Eficiência do Armazenamento Complementar de Energia Junto a Usinas Hidrelétricas, Utilizando Tecnologias de Armazenamento Eletroquímico e em Hidrogênio”⁴⁵, com volume de investimento de aproximadamente R\$ 30 milhões e duração estimada de 36 meses⁴⁶.

O projeto contempla o desenvolvimento de um Sistema Completo de Armazenamento de Energia Elétrica (SCAEE) composto basicamente, por um eletrolisador de água com 107 kW com capacidade de produção de hidrogênio de

⁴⁴ Em março de 2021 anunciou-se que foi dado início ao comissionamento do eletrolisador do projeto, indicando o estágio avançado do mesmo. <https://www.canalenergia.com.br/noticias/53166122/furnas-comeca-producao-de-hidrogenio-na-uhe-itumbiara>. Acesso em 11.03.2021.

⁴⁵ Código ANEEL PD-00061-0054/2016.

⁴⁶ <https://www.cesp.com.br/geracao-de-energia/dashboards/>. Acesso em 12.01.2021.

20 Nm³/h; dois tanques pressurizados para estocagem de hidrogênio com capacidade de 600 m³ (CNTP), equivalente a 54 kg de armazenamento de hidrogênio; uma pilha a combustível do tipo PEM (onde o eletrólito corresponde a um condutor iônico sólido, geralmente na forma de uma membrana polimérica) de 100 kW; um sistema auxiliar de armazenamento eletroquímico composto por um banco de baterias para atender a pequenas flutuações de carga; além de uma planta solar fotovoltaica de 400 kWp (SILVA et al., 2019). Dessa forma, o excedente de energia gerada das fontes hidrelétrica e solar é convertido em hidrogênio verde através do processo de eletrólise. O hidrogênio é armazenado em tanques para posterior utilização durante épocas de seca e horários de pico.

Projeto Unidade Piloto de Hidrogênio na UHE Itaipu Binacional

Por meio de uma parceria entre a Itaipu Binacional, Eletrobras e a Fundação Parque Tecnológico Itaipu (FPTI) e apoio do Centro Nacional de Referência em Energia do Hidrogênio (CENEH) da Unicamp o complexo da UHE Itaipu deu início no final de 2014 às operações de sua planta de hidrogênio experimental. O principal objetivo do projeto consiste no aproveitamento de energia que deixa de ser gerada pela água excedente do reservatório para abastecer uma grande central de produção de hidrogênio. Acredita-se que o mesmo modelo poderá ser replicado em outras UHEs no Brasil, possibilitando a propagação de modelos de negócio em hidrogênio verde no país. A planta conta com uma célula a combustível de 6 kW, que demonstrou em testes atender ao sistema de iluminação da PPH, com 21 luminárias com consumo de 70 W cada e potência total de 1.470 W. Para converter a energia da célula para o sistema de iluminação são usados inversores e transformadores. A célula tem capacidade de garantir eletricidade para até 285 luminárias de 70 W (ABRAPCH, 2021). O projeto também prevê a armazenagem do hidrogênio sustentável em cilindros e uso em pilhas a combustível para utilização e estacionária e veicular para a frota de veículos elétricos de Itaipu por meio do Programa de Veículo Elétrico da organização.

Projeto Bio-Hidrogênio ERGOSTECH Renewable Energy Solutions

Fundada em 2004 por meio de uma parceria com a cervejaria japonesa Sapporo, a startup Ergostech recebeu em 2010 um aporte da Petrobras para o desenvolvimento de soluções em processos para produção de bio-hidrogênio a partir de resíduos orgânicos, principalmente efluentes agroindustriais (VALOR ECONÔMICO, 2019). Ao longo deste período, foi construída a única planta existente no mundo para a produção de bio-hidrogênio via processo fermentativo anaeróbio e uma estrutura laboratorial sofisticada para suporte das atividades da pesquisa em desenvolvimento, visando melhorias de processo e produtividade para produzir hidrogênio, biogás e outros produtos a partir de resíduos agroindustriais⁴⁷. Como o mercado para o hidrogênio ainda é incerto no Brasil, a startup voltou-se para o mercado americano: está construindo uma fábrica em Fresno, na Califórnia, que deverá entrar em operação em 2021 e irá produzir hidrogênio a partir de biomassa, com resíduos agrícolas e das indústrias alimentícias locais. Para 2022, a startup já está fechando parcerias com distribuidoras de combustíveis da região para montar quatro postos de abastecimento de hidrogênio combustível com foco em veículos pesados.

Projeto H2: Desenvolvimento de plataforma de análise técnica, econômica e ambiental da viabilidade da produção, armazenamento, transporte e uso final de hidrogênio

O projeto viabilizado via o Programa de P&D Aneel tem como principal objetivo desenvolver uma plataforma para avaliação de viabilidade técnica, ambiental e econômica da produção, armazenamento, transporte e uso final de hidrogênio azul e verde. O proponente do projeto foi a Guascor do Brasil Ltda.⁴⁸, empresa do grupo Siemens Ltda. e os responsáveis pela execução são o Grupo de Estudos do Setor Elétrico (GESEL) do Instituto de Economia da Universidade Federal do Rio de Janeiro (IE/UFRJ) e o Instituto de Energia (IEPUC) da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Para o projeto com duração prevista de 24 meses foram estabelecidas três principais metas.

⁴⁷ <http://ergostech.com.br/bio-hidrogenio/>.

⁴⁸ A empresa foi adquirida em 2016 pela Siemens Ltda e fornece motores a diesel e a gás bem como de soluções de energia personalizadas, com forte atuação em modelos descentralizados e autônomos.

A primeira consiste na identificação das principais oportunidades e nichos de inserção do hidrogênio e derivados no Brasil. Nesse sentido, o projeto fará um levantamento voltado para os principais grupos de pesquisas e industriais sobre o estado da arte de produção de hidrogênio azul e verde no Brasil, bem como das principais oportunidades projetadas e nichos de atuação para o hidrogênio e seus derivados. Além disso a primeira meta também contempla uma análise em âmbito internacional sobre as melhores práticas no desenvolvimento de plataformas de análise para a produção, armazenamento, transporte e uso final de H₂ e seus derivados.

A segunda meta objetiva o desenvolvimento de uma plataforma de análise, incluindo princípios básicos, arquitetura e ferramenta de georreferenciamento a serem utilizados na construção da mesma.

Por fim, a terceira e última meta do projeto consiste na realização de simulações por meio da plataforma desenvolvida de diferentes cenários e casos de uso de produção, armazenamento, transporte e uso final de hidrogênio verde e azul. O projeto possui uma *homepage* na qual serão divulgados os principais resultados para o público em geral. Além disso, podem ser consultadas notícias atuais sobre o desenvolvimento do mercado de hidrogênio no Brasil e no mundo⁴⁹.

Projetos iniciais para exportação de hidrogênio verde

A necessidade de importação de hidrogênio verde dos países na Europa tem despertado o interesse de alguns atores para desenvolver soluções de hidrogênio verde. O Porto do Açu, localizado no norte do estado de Rio de Janeiro, assinou um Memorando de entendimento (MoU) com a empresa australiana Fortescue Future Industries para a elaboração de um estudo de viabilidade para a produção de hidrogênio verde e amônia verde para a indústria de fertilizantes como também para exportação.

No Ceará, o governo do estado, a Federação das Indústrias do Estado do Ceará (FIEC), a Universidade Federal do Ceará (UFC) e o Complexo do Porto do Pecém assinaram em fevereiro de 2021 um MoU para construção de um hub de hidrogênio no Porto do Pecém, com fins de exportação do hidrogênio verde e também utilização em atividades econômicas no Brasil. Além disso, o governo do estado também assinou um MoU com a empresa australiana Enegix, que pretende instalar uma planta de produção de hidrogênio verde. Informações iniciais confirmam investimentos pela empresa australiana de USD 5,4 bilhões, incluindo uma construção de uma planta de eletrólise, denominada Base One⁵⁰. O planejamento de negócios do projeto prevê a exportação do hidrogênio para grandes mercados consumidores, conforme ilustrado na Figura 17. A empresa comunicou em seu site que irá implementar e gerenciar as redes de energia elétrica em escala de serviço com energia do hidrogênio.

O Porto do Açu e o Porto do Pecém são administrados por portos de maior relevância na Europa (Rotterdam-Holanda Antuérpia-Bélgica, respectivamente). Tal envolvimento de grandes atores europeus na área de logística abre oportunidades para fluxos de comércio internacional e investimentos oriundos do continente europeu para o hidrogênio verde no Brasil.



Figura 17 – Exportação de H₂ verde do Projeto Base One - Ceará. Fonte: Enegix (2021).

⁴⁹ Mais informações podem ser verificadas em <https://projetoH2.com.br/projeto/#>. Acesso em 11.03.2021.

⁵⁰ <https://www.h2bulletin.com/brazil-announces-us-5-4-green-hydrogen-hub-for-global-supply/>

3.5 Potencial de produção de hidrogênio verde para consumo local e exportação

A produção de hidrogênio verde no Brasil a partir de fontes renováveis de energia possui elevado potencial em função da grande participação das mesmas nas matrizes energética e elétrica do país (46,2% e 83%, respectivamente (EPE 2020)). A Tabela 4 demonstra a capacidade instalada de geração de energias renováveis no Brasil e seus respectivos percentuais de participação na matriz elétrica no ano de 2019.

Pode-se observar que a energia eólica, além de apresentar contribuição significativa para a matriz elétrica renovável brasileira, também apresenta um crescimento expressivo desde 2016. Apenas entre os anos de 2017 e 2019, a capacidade instalada de fonte eólica cresceu mais de 3 GW no país. No caso da geração elétrica solar fotovoltaica, embora o percentual ainda seja pequeno, destaca-se o crescimento da capacidade instalada de 37,6 % em 2019 comparado a 2018.

A expressiva participação de fontes renováveis na matriz elétrica brasileira se dá naturalmente pela abundância de tais fontes, mas também decorre do desenvolvimento de uma estrutura institucional aprimorada no país ao longo dos últimos anos, o que acabou por fornecer condições para o incremento e competitividade das renováveis na matriz brasileira. Dentre as principais ações e mecanismos que favoreceram o ambiente técnico, regulatório e a competitividade das energias renováveis, podemos citar uma política energética com planejamento de longo prazo (EPE), operação centralizada do sistema elétrico que atende a carga espacialmente dispersa no território brasileiro, marco regulatório consistente e independente (ANEEL), eficiente sistema de compensação de contratos (CCEE) e padrão de financiamento consolidado (BNDES) (CASTRO et al., 2021).

A participação de fontes renováveis na geração elétrica brasileira apresenta grande destaque quando comparada a outros países ao longo do globo. A Figura 18 apresenta um ranking da participação das energias renováveis na geração de energia elétrica de diversos países⁵¹.



Figura 18 – Participação mundial de fontes renováveis na geração elétrica em 2019. Fonte: Enerdata Year Book (2020)⁵².

De forma a sumarizar a disposição de fontes renováveis com potencial para geração de hidrogênio verde no Brasil, apresenta-se na Figura 19 um modelo esquemático simplificado sobre tais fontes e respectivas rotas tecnológicas. Em relação às rotas tecnológicas, as fontes renováveis de maior potencial no Brasil para a geração de hidrogênio verde são as fontes alternativas (solar, eólica e hidrelétrica), os biocombustíveis, o biogás e os bio-resíduos. Tais fontes servem como insumos dos processos de eletrólise, reforma, pirólise ou gaseificação para a obtenção de hidrogênio verde.

Tabela 4 – Capacidade instalada de geração elétrica no Brasil (MW) – Fontes Renováveis. Fonte: EPE – Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2020.

	2016	2017	2018	2019	Δ% (2019/2018)	Part. % (2019)
Total Renováveis	120.986	127.783	134.896	141.612	5	83
Usinas Hidrelétricas	91.499	94.662	98.287	102.999	4,8	60,5
PCH	4.941	5.020	5.157	5.291	2,6	3,1
CGH	484	594	695	768	10,5	0,5
Biomassa	13.913	14.289	14.569	14.703	0,9	8,6
Usinas Eólicas	10.124	12.283	14.390	15.378	6,9	9,0
Solar	24	935	1.798	2.473	37,6	1,5

⁵¹ O método de cálculo consiste na razão da geração de eletricidade a partir de fontes renováveis (hidrelétrica, eólica, solar e geotérmica) e o total de geração elétrica, comparativamente para o ano de 2019.

⁵² <https://yearbook.enerdata.net/renewables/renewable-in-electricity-production-share.html>

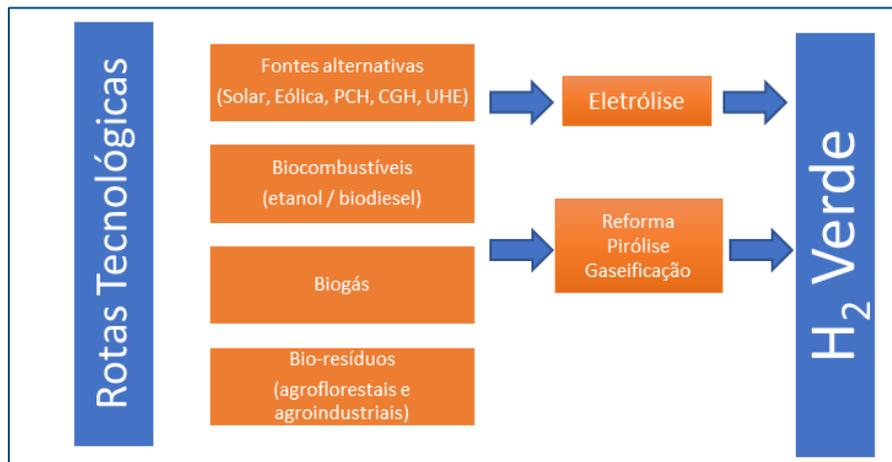


Figura 19 – Principais rotas tecnológicas de H₂ verde no Brasil. Fonte: Elaboração própria.

Faz-se necessário verificar a seguir como se dá a distribuição geográfica das fontes renováveis com potencial para geração de hidrogênio verde no país. As Figuras 20 e 21 apresentam respectivamente, a distribuição geográfica da geração de energia eólica e da energia solar fotovoltaica.

Em 2019 o Brasil figurou na sétima posição mundial de capacidade total instalada de geração eólica, com 15.449 MW. Pela Figura 20 destaca-se a predominância da região Nordeste como a maior geradora de energia eólica do Brasil, sendo o estado do Rio Grande do Norte o maior produtor, seguido dos estados da Bahia e Piauí. Apenas em 2019, foram instalados 38 novos parques eólicos nos estados da Bahia, Grande do Norte e Maranhão, com um total de 744,95 MW de nova capacidade. É válido ainda ressaltar que 88% da energia consumida no subsistema nordeste veio da energia eólica e que em relação ao fator de capacidade, a região também apresenta os maiores índices, com destaque para os estados do Maranhão, Pernambuco e Ceará.

A região Nordeste correspondeu, em 2019, a 86,7% dos 54,37 TWh de geração total de energia eólica no país. Já a região Sul, onde percebe-se a segunda maior concentração dessa fonte, correspondeu a 5,62% da geração total (ABEEÓLICA, 2020).

O parque eólico brasileiro hoje representa quase 10% da matriz elétrica e está em constante crescimento. Isso se deve em primeiro lugar pelas condições climáticas favoráveis (velocidade dos ventos, estabilidade e baixa sazonalidade) mas também pelos preços obtidos nos leilões, consequência do desenvolvimento de uma cadeia de produção e tecnologias produzidas no Brasil. Nesse sentido, destaca-se o papel do Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA). Além de incentivar o desenvolvimento das fontes renováveis na matriz energética, o PROINFA abriu caminho para a fixação da indústria de componentes e turbinas eólicas no Brasil com exigências de conteúdo nacional como por exemplo para os aerogeradores.



Figura 20 – Distribuição geográfica: geração eólica. Fonte: Sistema de Informações de Geração da ANEEL (SIGA).



Figura 21 – Distribuição geográfica: geração solar fotovoltaica. Fonte: Sistema de Informações de Geração da ANEEL (SIGA).

Adicionalmente ao potencial eólico estimado de 500 GW⁵³ em terra (*onshore*), o potencial da energia eólica marítima (*offshore*) desponta atualmente no Brasil. De acordo com o “Roadmap Eólica Offshore Brasil” (EPE, 2020b), estudos de potencial realizados apontam para a existência de potencial técnico de cerca de 700 GW em locais com profundidade até 50 m no mar. Nesse sentido, estão atualmente em desenvolvimento no Brasil regras ambientais para produção marítima (*offshore*) de energia eólica, o que irá ampliar ainda mais a participação dessa fonte na matriz elétrica do país. De acordo com a ABEEólica (2021) o lançamento em 2020 pelo Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA) de um Termo de Referência para a realização dos estudos de impacto ambiental no ambiente *offshore* foi considerado pelo setor um grande marco para o desenvolvimento do mercado eólico *offshore* no país. Além disso, tramitam atualmente no IBAMA sete projetos em processo de licenciamento, o que confere uma perspectiva de crescimento elevado da capacidade eólica instalada no Brasil, conforme também apontado no Plano Decenal de Expansão de Energia 2029 (MME/EPE, 2020b).

Em relação à energia solar fotovoltaica, o parque gerador é ainda incipiente no Brasil, todavia em rápido crescimento. Como pode ser visto na Figura 21, constata-se elevada concentração de usinas geradoras de energia solar fotovoltaica nas regiões Norte e Nordeste do país, com destaque para os estados do Pará, Ceará, Paraíba, Alagoas, Piauí, e o extremo norte da Bahia. No entanto, diferentemente da distribuição geográfica da fonte eólica, a fonte solar apresenta boa distribuição ao longo de todos os estados e regiões do país.



Figura 22 – Distribuição geográfica: PCHs e CGHs.
Fonte: ANEEL (SIGA) (2021).

Tal fato decorre do elevado crescimento da geração distribuída no país, que desde 2018 já ultrapassou a geração centralizada, atingindo em 2020 o marco de 4 GW de capacidade instalada. Destacam-se em termos de potência instalada na geração distribuída fotovoltaica os estados de Minas Gerais (887 MW), São Paulo (613,6 MW) e Rio Grande do Sul (601,8 MW), correspondendo de forma conjunta a quase 43% da geração distribuída no país. O “Plano Decenal de Expansão de Energia 2029” prevê-se um elevado crescimento da fonte solar fotovoltaica na contribuição da capacidade instalada total do país, crescendo de atualmente pouco menos de 2% para 8% em 2029 (MME/EPE, 2020b). Da mesma forma que para a fonte solar fotovoltaica, constata-se pelas Figuras 22 e 23 uma acentuada distribuição geográfica das fontes geradoras de energia hídrica (PCHs, GCHs e UHEs) pelo país. Serão analisadas a seguir as pequenas centrais hidrelétricas (PCHs) e as centrais geradoras hidrelétricas (CGHs) instaladas no país, por apresentarem menor impacto ambiental quando comparadas a usinas hidrelétricas (UHEs).

As PCHs e CGHs são usinas hidrelétricas de tamanho e potência relativamente reduzidos quando comparados a uma UHE. As PCHs têm entre 5 e 50 MW de potência e não podem ultrapassar 13 km² de área de reservatório. Atualmente as PCHs representam pouco mais de 3% da capacidade instalada no país. Já as CGHs são ainda menores em termos de potência e porte, não podendo ultrapassar os 5 MW de potência instalada. Atualmente o Brasil possui 704 CGHs e 425 PCHs em operação em todo o seu território, correspondendo a pouco menos de 6 GW de potência instalada (ABRAPCH, 2021).



Figura 23 – Distribuição geográfica: UHEs.
Fonte: ANEEL (SIGA) (2021).

⁵³ <https://cenarioeolica.editorabrasilenergia.com.br/panorama/atlas-2/>. Acesso em 08.04.2021.

Conforme o “Plano Decenal de Expansão de Energia 2029”, está prevista uma oferta indicativa adicional de CGHs e PCHs de 2,1 GW até 2029, distribuídas entre as regiões Sudeste, Centro-Oeste e Sul. Por outro lado, as UHEs corresponderam, em 2019, a 60,5% de toda a capacidade instalada no Brasil. O aproveitamento hidrelétrico ainda apresenta um elemento relevante na ampliação de oferta de energia elétrica no Brasil. A oferta indicativa adicional de UHEs para o cenário 2029 é de 1,674 GW de potência com 7 novas UHEs (MME/EPE, 2020a). Embora as três fontes hídricas possam ser empregadas para a geração de hidrogênio renovável, as CGHs e PCHs mais modernas são a fio d’água, não necessitando de grandes reservatórios de água, resultando, portanto, em um menor impacto ambiental.

Considerando-se das tecnologias *Bio-to-Fuel* (vide Item 1.5), o Brasil possui grande potencial para o etanol (reforma), biogás (reforma), glicerina (reforma) e bio-resíduos (gaseificação).

As Figuras 24, 25, 26 e 27 apresentam, respectivamente, a distribuição da produção atual no Brasil de etanol, biogás, bio-resíduos e de biodiesel. Em relação ao etanol, o Brasil possui elevada produção a partir da cana de açúcar, processadas nas usinas de açúcar e álcool, as quais estão concentradas nas regiões Centro-Oeste, Sudeste e Nordeste. Devido à existência de uma indústria já consolidada, dedicada ao fornecimento do combustível para o setor automotivo, esse setor pode apresentar grande potencial para produção de hidrogênio. A produção de hidrogênio se dá pelo processo de reforma. Consta-se na Figura 24 abaixo uma elevada concentração de produção de etanol nas regiões Sudeste, Centro-Oeste e do norte do Paraná, bem como nas regiões próximas ao litoral

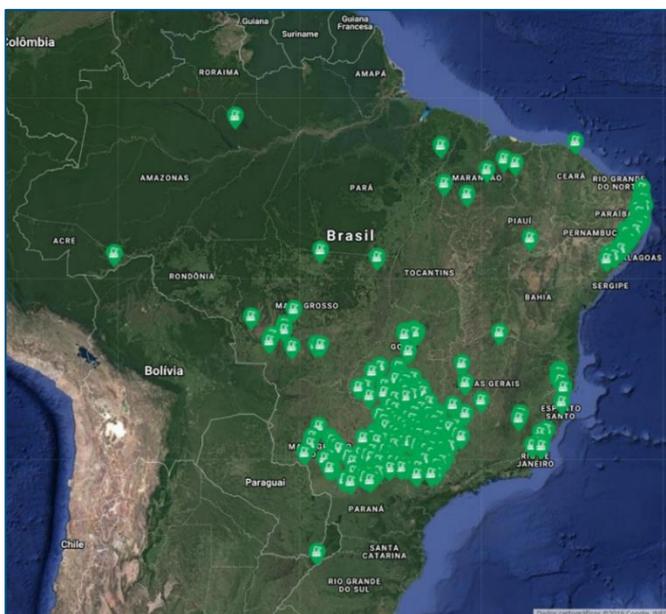


Figura 24 – Produção de etanol. Fonte: Infocana (2019).

dos estados de Pernambuco, Paraíba e Rio Grande do Norte.

O setor de biogás possui um mercado com alto potencial de crescimento. Segundo a Associação Brasileira do Biogás (ABiogás) a produção de biogás ocorre majoritariamente nos segmentos a seguir:

- Indústria de açúcar: 41,4Bi Nm³;
- Agro-indústria: 37,4Bi Nm³;
- Tratamento sanitário: 5,8Bi Nm³.

Nesse sentido, a capacidade de geração das plantas de biogás se dá da seguinte forma no Brasil:

- 51 plantas com geração de 1.250- a 8.500 Nm³/dia;
- 61 plantas com geração de 8.501 a 85.500 Nm³/dia;
- 23 plantas com geração de 85.501 a 350.000 Nm³/dia.

A distribuição das plantas de biogás no país, representada graficamente na Figura 25, apresenta maior concentração nas regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste.

No caso da produção de biodiesel, que possui como principal resíduo a glicerina, também pode ser uma fonte de hidrogênio através do processo de reforma. Sua concentração ocorre também nas regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste, conforme demonstrado na Figura 26.

Por fim, a Figura 27 apresenta um mapa sobre a localização dos resíduos agroflorestais e agroindustriais no Brasil. Embora grande parte dos resíduos agroindustriais já apresente aplicação, a biomassa residual de atividades agrícolas ainda é subutilizada no país. Nesse sentido, a biomassa residual pode ser utilizada como insumo na



Figura 25 – Produção de biogás. Fonte: CIBIOGAS (2019).

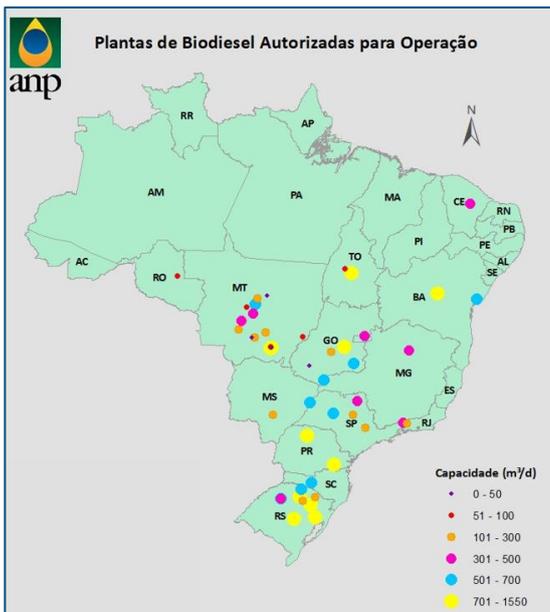


Figura 26 – Produção de biodiesel.
Fonte: SPC/ANP (2020).



Figura 27 – Disponibilidade de resíduos nas diferentes regiões.
Fonte: Jornal Brasileiro das Indústrias de Biomassa (2020).

produção de hidrogênio através de diferentes rotas tecnológicas como a gaseificação.

A Tabela 5 e a Tabela 6 a seguir demonstram a geração elétrica por fontes renováveis no Brasil e o consumo elétrico total, respectivamente, em GWh para o período de 2016 a 2019. Na Tabela 5, pode-se perceber a expressividade da fonte hidráulica na composição da matriz elétrica renovável do país, seguido das fontes eólica e biomassa.

Já pela Tabela 6 é possível perceber que o maior consumo elétrico se dá no setor industrial, com aproximadamente 35%, seguido dos setores residencial (aproximadamente 30%) e comercial (19%). É notável também o declínio de 1,1% no consumo de energia elétrica da classe industrial entre os anos de 2019 e 2018, coincidindo com a queda da produção industrial de 1,1% (IBGE, 2020).

Por fim, ressalta-se uma análise preliminar do potencial para a geração de hidrogênio verde no Brasil. Considerando o saldo entre a geração elétrica nacional apenas por fontes renováveis e o consumo total por classe é possível constatar que para o mesmo período (2016-2019), sem considerar perdas, haveria um saldo positivo disponível de produção excedente para a geração de hidrogênio verde no país, com a exceção do ano de 2017, conforme demonstrado na Tabela 7.

Se consideradas as perdas do Sistema Interligado Nacional (SIN), de em média 20%, apenas a geração elétrica por fontes renováveis teria sido capaz de suprir as classes de consumo industrial e residencial no período, restando ainda um excedente de 72.739 GWh em 2017 a 103.223 GWh em 2019 para a geração de hidrogênio verde, conforme indicado na Tabela 8.

Para encerrar a breve análise sobre os potenciais de produção de hidrogênio a partir de fontes renováveis no país, destaca-se a previsão de crescimento entre 2019 e 2029 da participação das fontes solar e eólica na composição da capacidade instalada total para 8% e 16% respectivamente, conforme demonstrado na Tabela 9. A partir de tais indicadores é possível concluir que, não obstante o crescimento no consumo energético para o mesmo período, o incremento da participação das fontes renováveis na capacidade instalada também poderá por sua vez contribuir para o potencial de produção de hidrogênio verde no país.

Atualmente, como a vasta maioria do hidrogênio produzido no Brasil (cerca de 95%) é de origem fóssil para a síntese de produtos (autoprodutor Petrobras), a produção se dá de forma on-site, com predominância de unidades de produção nas refinarias das regiões Sudeste e Nordeste. No entanto, ao analisar o potencial para a produção de hidrogênio verde, constata-se uma excelente distribuição de unidades geradoras de energia a partir de fontes renováveis em todas as regiões do país. Adicionalmente, para as fontes solar e eólica, espera-se um acentuado crescimento da participação de tais fontes na capacidade de geração do país, conforme demonstrado anteriormente na Tabela 9.

Dessa forma, para atendimento da demanda futura no mercado interno nacional por hidrogênio verde, a produção pode se dar de forma semi-centralizada nas proximidades dos grandes centros econômicos e parques industriais consumidores de hidrogênio verde no país, a exemplo de como se dá atualmente a indústria de transformação.

Tabela 5 – Geração elétrica por fonte no Brasil (GWh) – Fontes Renováveis. Fonte: EPE – Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2020.

	2016	2017	2018	2019	Δ% (2019/2018)	Part. % (2019)
Total Renováveis	463.721	463.496	492.784	512.624	4,1	81,8
Hidráulica	380.911	370.906	388.971	397.877	2,3	63,5
Biomassa	49.236	49.385	51.876	52.111	0,5	8,3
Eólica	33.489	42.373	48.475	55.986	15,5	8,9
Solar	85	831	3.461	6.651	92,1	1,1

Conforme apresentado por meio das Figuras 20 a 27 o Brasil apresenta elevada diversidade e distribuição de fontes renováveis com capacidade de geração do hidrogênio verde, seja via fontes hídrica (UHEs, PCHs, CGHs), eólica ou solar fotovoltaica, assim como via fontes alternativas com potencial para as tecnologias *Bio to Fuel*, tais como a biomassa, o biogás e os bio-resíduos.

Já para os sistemas isolados há a possibilidade de geração de hidrogênio verde de forma *on-site* por meio de sistemas híbridos. No Brasil, existem atualmente cerca de 235 localidades com geração de energia isolada, como nos estados do Acre, Amapá, Amazonas, Mato Grosso, Pará, Rondônia e Roraima, além da ilha de Fernando de Noronha. Em 2019 foi realizado, de forma inédita, um leilão de 294 MW de fornecimento de energia, no qual sistemas híbridos de soluções solar fotovoltaicas, de biocombustíveis e de baterias tiveram posição de destaque. Dessa forma, constata-se o potencial para ampliação das instalações híbridas incluindo a utilização do hidrogênio verde que favoreçam um fornecimento de energia mais sustentável nos sistemas isolados brasileiros.

Por fim, faz-se necessário a avaliação quanto ao potencial de produção de hidrogênio verde no país para exportação. Países da Europa e Ásia estão se transformando em *"Hydrogen Societies"*⁵⁴ (sociedades de hidrogênio) e suas economias, em especial os setores industrial e de transportes, demandarão hidrogênio verde em larga escala em um horizonte de 30 anos. Da mesma forma, os demais países da União Europeia, a partir do comprometimento de metas de descarbonização ambiciosas até 2050, por meio do Pacto Ecológico Europeu (*European Green Deal*), juntamente de diversos países ao longo do globo signatários do Acordo de Paris, precisarão inevitavelmente buscar parcerias internacionais para suprir suas demandas internas de hidrogênio verde.

Nesse sentido, constata-se que o Brasil possui condições extremamente favoráveis para desempenhar um papel importante no mercado global de fornecimento de hidrogênio verde que se desponta nesse momento. Dessa forma, a produção e exportação de hidrogênio verde representam uma nova oportunidade de negócios para o Brasil (CASTRO et al., 2021).

Tabela 6 – Consumo por classe (GWh). Fonte: EPE – Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2020.

	2016	2017	2018	2019	Δ% (2019/2018)	Part. % (2019)
Brasil	461.780	467.161	474.820	482.226	1,6	100,0
Residencial	132.872	134.369	137.615	142.781	3,8	29,6
Industrial	165.314	167.398	169.625	167.684	-1,1	34,8
Comercial	87.873	88.292	88.631	92.075	3,9	19,1
Rural	27.267	28.136	29.168	28.870	-1,0	6,0
Poder Público	15.096	15.052	15.076	15.752	4,5	3,3
Iluminação Pública	15.035	15.443	15.690	15.850	1,0	3,3
Serviço Público	14.969	15.196	15.778	15.958	1,1	3,3
Consumo próprio	3.355	3.277	3.238	3.257	0,6	0,7

⁵⁴ <https://www.forbes.com/sites/mitsubishiheavyindustries/2021/02/25/how-the-lone-star-state-is-building-a-green-hydrogen-future/?sh=3b85fdee7e8a>

Tabela 7 – Saldo entre Geração Renovável e Consumos Totais (GWh).

Fonte: EPE – Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2020. Elaboração própria.

	2016	2017	2018	2019
Geração Elétrica Renovável	463.721	463.496	492.784	512.624
Consumo Total	461.780	467.161	474.820	482.226
Saldo	1.942	-3.665	17.964	30.398

Tabela 8 – Saldo entre Geração Renovável e Consumo Industrial e Residencial (GWh).

Fonte: EPE – Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2020. Elaboração própria.

	2016	2017	2018	2019
Geração Elétrica Renovável	463.721	463.496	492.784	512.624
Perdas do SIN	19,2%	19,2%	19,1%	19,3%
Saldo Geração Líquida	374.687	374.505	398.662	413.688
Consumo Industrial + Residencial	298.186	301.766	307.240	310.465
Saldo Final	76.501	72.739	91.422	103.223

Fazendo uma avaliação do potencial de produção do hidrogênio verde para exportação, é perceptível que a disposição geográfica da região Nordeste do país, somada ao elevado fator de produção dos parques geradores eólicos, resultam em um grande potencial para geração de hidrogênio verde para exportação. Tomando como base os portos de maior movimentação na União Europeia (Rotterdam, Hamburgo e Antuérpia), a distância geográfica média entre Fortaleza é de cerca de 7,5 mil km, ao passo que a distância de Porto Alegre até tais portos é cerca de 40% maior (10,6 mil km). Sobre o potencial de geração de hidrogênio verde a partir da fonte eólica, deve-se considerar ainda como fatores favoráveis a abertura do mercado *offshore* e o crescente protagonismo que tal fonte vem assumindo na capacidade instalada da matriz elétrica brasileira, com previsões de crescimento de mais de 260% entre os anos de 2019 e 2029, conforme indicado na Tabela 9. Ainda assim, não deverá ser reduzido o potencial exportador de hidrogênio verde à fonte eólica.

A fonte solar fotovoltaica, por exemplo, também apresenta grandes potenciais para a produção de hidrogênio verde para exportação. Já o potencial da energia solar é de 307 GWp, atualmente com pouco mais de 3 GWp instalados (CASTRO et al., 2021). Além disso, constata-se uma redução nos custos de geração de energia renovável significativa no país, conforme evolução de queda dos preços nos leilões de energia do mercado regulado. O preço médio da energia solar fotovoltaica nos leilões em 2013 foi de USD 103/MWh. Já em 2019, o preço médio foi de USD 20,3/MWh, conferindo uma redução de aproximadamente 80% do preço médio dos primeiros certames de energia solar fotovoltaica no Brasil (ABSOLAR, 2021). Conforme apontado pela IEA (2019), as regiões do globo onde a disponibilidade das fontes solar e eólica é elevada, possuem potencial para apresentar os menores custos de produção de hidrogênio verde.

Tabela 9 – Evolução da composição da capacidade instalada total por fonte (GWh).

Fonte: EPE – Plano Decenal de Expansão de Energia 2029.

FONTE	2019	%	2029	%
Hidráulica	101.926	58%	104.701	42%
PCH	6.458	4%	9.956	4%
Gás Natural	12.921	7%	36.190	14%
Outros	15.881	9%	14.596	6%
Eólica	15.045	9%	39.561	16%
Biomassa	19.928	11%	25.535	10%
Solar	3.354	2%	20.444	8%
TOTAL DISPONÍVEL	175.513	100%	250.983	100%

A Figura 28 apresenta em um esquema de cores as perspectivas de custos de produção de hidrogênio verde no mundo, de acordo com a disponibilidade das duas fontes. Os países e regiões sinalizadas em vermelho apresentam potencialmente os menores custos de produção, abaixo de USD 1,6 por kg de hidrogênio verde. Destacam-se nessa categoria países como o Chile e algumas regiões da China. Já o Brasil, devido à sua extensão territorial e diversidade climática e geográfica, apresenta regiões de baixo custo de produção assim como regiões de elevado custo, como no caso da região Amazônica sinalizada em azul. No entanto, em sua grande maioria, o país apresenta custos de produção que variam de USD 2,4 a 3,0 por kg de hidrogênio verde, conferindo ao país, sob essa ótica, boa competitividade no fornecimento de mercado de hidrogênio verde global.

3.5.1 Estudo de caso: fertilizantes nitrogenados

O Brasil é um dos maiores produtores e exportadores agrícolas do mundo e, portanto, um importante ator no mercado consumidor de fertilizantes. Não obstante os impactos na economia em decorrência da Pandemia COVID-19, o PIB do setor agropecuário foi o único dos três grandes setores da economia (agropecuária, serviços e indústria) que apresentou crescimento (2% quando em relação a 2019), contribuindo em 6,8% para o PIB brasileiro em 2020 (IBGE 2021).

Os fertilizantes são elementos essenciais para a cadeia de produção agrícola, possibilitando um aumento da produtividade por hectare e reduzindo a degradação do solo agricultável. Atualmente o Brasil é o quarto maior consumidor de fertilizantes do mundo, apenas atrás da China, Índia e EUA. A Figura 29 demonstra a relação positiva entre o crescimento da produção de grãos e o consumo de fertilizantes no país entre os anos de 1995 a 2018.

Dentre os elementos essenciais para o desenvolvimento das plantas, destacam-se os denominados “macronutrientes”, por serem utilizados em larga escala. Tais nutrientes são o nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K). Em relação à cadeia produtiva de fertilizantes, a mesma tem início na extração da matéria prima desdobrando-se até o agricultor, envolvendo diversos setores da economia tais como o setor de petróleo e gás, mineração, indústria de transformação e a própria agricultura.

O nitrogênio é a matéria prima básica para os fertilizantes nitrogenados, como a amônia e a ureia. Conforme mencionado no Item 1.5. do presente estudo, para a obtenção da amônia, é necessário a utilização de gás natural (ou ainda com menor relevância da nafta ou carvão), para a geração de hidrogênio, que quando combinado com o nitrogênio em um processo conhecido como “Síntese de Harber-Bosch”, obtém-se a amônia (NH_3). Dessa forma, é possível concluir que o gás natural é um dos elementos essenciais para a obtenção dos fertilizantes nitrogenados.

No que tange o mercado de fertilizantes no Brasil, a partir da década de 1990 houve um movimento de fusões e aquisições no setor. Recentemente, um dos últimos movimentos foi a saída da Vale Fertilizantes do setor, com a venda das plantas de produção de nitrogênio para a norueguesa Yara e de fosfato e potássio para a norte-americana Mosaic (FARIAS et al., 2020). As duas adquirentes são líderes globais no mercado de fertilizantes. Da mesma forma, o “Plano de Negócios e Gestão 2017-2021” e posteriores da Petrobras previu a hibernação e venda de 100% de suas unidades de fertilizantes no Brasil.

Percebe-se que com a elevação nos preços do gás natural no Brasil aliada aos fluxos globais de fusões e aquisições, a produção nacional de fertilizantes foi se tornando cada vez menos expressiva, ocasionando uma elevada dependência do fornecimento internacional e deixando o setor agrícola

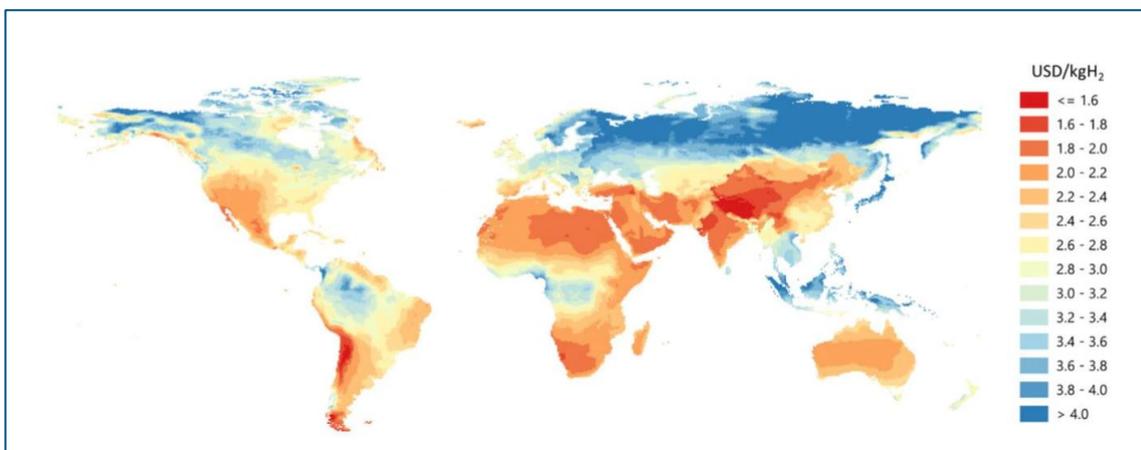


Figura 28 – Custos de geração de H₂ verde a partir de fontes eólica e solar. Fonte: IEA (2019).

extremamente vulnerável às flutuações cambiais, aos custos logísticos intercontinentais e a escassez de insumos básicos. Para FARIAS et al. (2020) os elevados preços de comercialização do gás natural no país inviabilizam atualmente o crescimento de uma indústria de fertilizantes nitrogenados.

Nesse sentido, cerca de 85% do mercado doméstico de fertilizantes é atendido através de importação⁵⁵, correspondendo, em 2020, ao segundo lugar nas importações totais e da indústria de transformação brasileira. Em decorrência disso, a participação da importação de fertilizantes nitrogenados possui grande expressividade na balança comercial brasileira. O Brasil importou cerca de 9 milhões de toneladas de fertilizantes nitrogenados em 2018, o dobro quando comparado a 2008. Dados do portal Comex Stat do MIDC informam que, em 2020, foram importados 34.230.454 t de adubos e fertilizantes químicos (COMEX STAT, 2021).

Conforme mencionado no Item 1.5, a *E-ammonia*, também conhecida como amônia verde, é produzida a partir de hidrogênio sustentável por meio de reação do mesmo com o nitrogênio. Dessa forma, o hidrogênio verde pode substituir o gás natural como insumo na produção dos fertilizantes nitrogenados, apresentando uma alternativa plausível para a redução da dependência das importações para esse item.

A amônia verde é atualmente uma das formas mais promissoras para o transporte intercontinental do hidrogênio verde. Nesse sentido, pode-se prever também que o excedente da NH₃ verde produzido para a indústria nacional de fertilizantes nitrogenados poderia ser exportado para países com elevada demanda pelo hidrogênio verde, tais como os da União Europeia.

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

Por fim, ressalta-se que a utilização massiva de fertilizantes na atividade agrícola vem recebendo cada vez mais atenção por organismos internacionais devido ao impacto ambiental e risco de poluição dos cursos d'água, conhecido como processo de eutrofização⁵⁶. Nesse sentido, o controle de utilização de fertilizantes na Europa e as recomendações por meio de padrões de referência e políticas de boas práticas na agricultura para a utilização consciente do insumo agrícola estão em constante evolução (EUROSTAT, 2020).

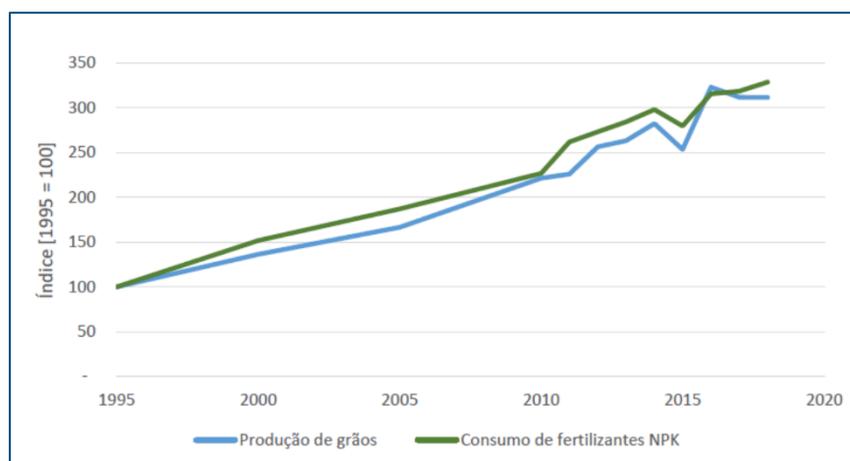


Figura 29 – Produção de grãos e consumo de fertilizantes NPK.

Fonte: Elaboração a partir de CONAB (2018) e ANDA (2019).

⁵⁵ <https://diariodocomercio.com.br/agronegocio/uso-de-adubos-na-agricultura-nacional-deve-fechar-o-ano-com-avanco-de-3/>. Acesso em 15.01.2021.

⁵⁶ O processo de eutrofização consiste no aumento de nutrientes, especialmente fósforo e nitrogênio, provocando o surgimento excessivo de organismos como algas e cianobactérias. Por consequência, a quantidade de oxigênio no ambiente eutrofizado diminui, causando a morte de várias espécies. <https://brasilescola.uol.com.br/biologia/eutrofizacao.htm>. Acesso em 08.04.2021.

3.6 Mapeamento

A seguir, será apresentado o mapeamento realizado para identificação dos principais atores atuantes ou com potencial de atuação futura na cadeia produtiva de hidrogênio no Brasil. É importante ressaltar que tal mapeamento foi conduzido de forma ampla, porém sem a pretensão de apresentar os atores da cadeia de produção em sua totalidade. Acredita-se que o desenvolvimento de uma economia de hidrogênio verde promova uma transformação da economia brasileira como um todo, atingindo todos os segmentos da cadeia de produção. Dessa forma, pode-se concluir que a realização de uma pesquisa com todos os atores de cada segmento significaria listar boa parcela das empresas instaladas no Brasil, o que fugiria do escopo e propósito do presente estudo.

O mapeamento foi atualizado de forma dinâmica a partir da realização da pesquisa de opinião, a ser descrita no Capítulo 4 do presente estudo. Foram identificados um total de 203 atores.

A relação de atores elaborada possui como objetivo apresentar atuais e potenciais áreas para aplicação do hidrogênio verde no país, bem como identificar os principais atores de cada setor.

3.6.1 Produtores

Para a categoria de produtores foram consideradas empresas produtoras de hidrogênio que possam transformar sua base atual de produção de hidrogênio cinza, tornando-se produtores de hidrogênio verde para fins energéticos no futuro. Nessa avaliação foram considerados também atuais produtores de energia limpa, tais como as empresas do setor elétrico, operadoras de usinas hidrelétricas e empresas produtoras de etanol com elevado potencial. Em alguns casos como a de FURNAS Centrais Elétricas S/A (usina hidrelétrica de Itumbiara) já existem inclusive projetos em implementação, conforme Item 3.4 do presente estudo. Da mesma forma, foram incluídas empresas do setor de petróleo e gás, as quais, apesar da atividade econômica ser baseada em fontes fósseis, apresentam na atualidade uma forte tendência de diversificação de sua área de atuação para negócios mais sustentáveis⁵⁷. Os produtores mapeados são apresentados na Tabela 10.

⁵⁷ A Total S.A. anunciou que planeja cessar o processamento de petróleo na Refinaria de Grandpuits, Paris, em março de 2021, dando início a adaptações na unidade para produção de combustíveis renováveis, reciclagem de plásticos e bioplásticos até 2024. A Shell, por sua vez, declarou que reduzirá sua participação em refino, ficando com seis das suas quatorze refinarias até 2025. As seis refinarias que permanecerão no portfólio da empresa terão maior integração com a petroquímica, produção de biocombustíveis e geração de hidrogênio (GAUTO, 2020).

Tabela 10 – Produtores de H₂ verde. Fonte: Elaboração própria.

	Empresa	Categoria	Site
1	AES Tietê	Produtor de Energia Renovável	https://www.aestiete.com.br
2	Air Liquide	Produtor de H ₂	https://industrial.airliquide.com.br
3	Air Products	Produtor de H ₂	http://www.airproducts.com.br
4	Aliança Geração de Energia	Produtor de Energia Renovável	https://aliancaenergia.com.br/br
5	BP	Produtor potencial H ₂	https://www.bp.com/pt_br/brazil
6	BW GUIRAPÁ	Produtor de Energia Renovável	http://www.bwguirapa.com.br
7	CEMIG	Produtor de Energia Renovável	http://www.cemig.com.br
8	CEPEL	Produtor de Energia Renovável	http://www.cepel.br
9	Cesp	Produtor de Energia Renovável	https://www.cesp.com.br
10	Copel	Produtor de Energia Renovável	https://www.copel.com/hpcweb
11	EDF	Produtor de Energia Renovável	http://edfnortefluminese.com.br
12	Enel Green Power	Produtor de Energia Renovável	https://www.enelgreenpower.com
13	Engie Brasil	Produtor de Energia Renovável	https://www.engie.com.br
14	Equinor	Produtor potencial H ₂	https://www.equinor.com.br
15	Ergostech	Produtor de H ₂	http://ergostech.com.br
16	FURNAS Centrais Elétricas S/A	Produtor de Energia Renovável / Produtor de H ₂ (piloto)	https://www.furnas.com.br
17	Grupo Eletrobras	Produtor de Energia Renovável / Produtor de H ₂ (piloto)	https://eletrobras.com
18	Itaipu	Produtor de Energia Renovável / Produtor de H ₂ (piloto)	https://www.itaipu.gov.br
19	Kogas	Produtor potencial H ₂	http://www.kogas.or.kr
20	Linde/Praxair/White Martins	Produtor de H ₂	http://www.praxair.com.br
21	LINHARES GERAÇÃO S/A	Produtor de Energia Renovável	http://www.lgsa.com.br
22	Messer	Produtor de H ₂	www.messer.com.br
23	Petrobras	Produtor de H ₂	https://petrobras.com.br/pt
24	Porto do Açú	Produtor potencial H ₂	https://portodoacu.com.br
25	Porto do Aratú	Produtor potencial H ₂	http://codeba.com.br/eficiente/sites/portalcodeba/pt-br/home.php
26	Porto do Pecém	Produtor potencial H ₂	https://www.complexodopecem.com.br/porto
27	Raízen	Produtor de Energia Renovável	https://www.raizen.com.br
28	Recupera DOO	Produtor de H ₂	http://www.recupera.si/eng
29	São Martinho	Produtor de Energia Renovável	https://www.saomartinho.com.br
30	Shell	Produtor potencial H ₂	https://www.shell.com.br
31	Sinopec/Repsol	Produtor potencial H ₂	https://www.repsolsinopec.com.br
32	Total	Produtor potencial H ₂	https://www.totalbrasil.com
33	Wintershall DEA	Produtor potencial H ₂	https://wintershalldea.com/en/where-we-are/brazil

3.6.2 Consumidores

Além das empresas que hoje enquadram-se na categoria de consumidoras de hidrogênio nos setores petroquímico, siderúrgico, vidros planos e alimentos, também foram consideradas empresas de setores que apresentam potencial no futuro para utilização do hidrogênio verde no seu processo produtivo. Para essa avaliação foram considerados, em consonância com a literatura e discussões de organismos internacionais como o *Hydrogen Council* e o IEA, setores da economia e industriais com elevada demanda energética e difícil descarbonização.

Especificamente foram listadas empresas dos seguintes setores, conforme apresentado na Tabela 11:

- Cimento (P – com potencial de aplicação de hidrogênio verde);
- Energia (E/P – Consumidor (E)xistente de hidrogênio e com (P)otencial, dependendo da área);
- Fertilizantes (P – com potencial de aplicação de hidrogênio verde);
- Mineração (P – com potencial de aplicação de hidrogênio verde);
- Químico (E – Consumidor existente de hidrogênio);
- Siderúrgica (E/P – Consumidor existente de hidrogênio e com potencial, dependendo da área);
- Transportes (P – com potencial de aplicação de hidrogênio verde);
- Vidros Planos (E/P – Consumidor existente de hidrogênio e com potencial, dependendo da área);
- Alimentação (E – Consumidor existente de hidrogênio).

Tabela 11 – Consumidores de H₂ verde. Fonte: Elaboração própria.

	Empresa	Setor	(E)xistente / (P)otencial	Site
1	Crista Margarina	Alimentação	E	http://cristamargarina.com.br
2	BRF	Alimentação	E	https://www.brf-global.com
3	Cimento ITAMBÉ	Cimento	P	www.cimentoitambe.com.br
4	Ciplan	Cimento	P	www.ciplan.com.br
5	Crh	Cimento	P	www.crhbrazil.com
6	Intercement	Cimento	P	www.intercement.com
7	LafargeHolcim	Cimento	P	www.lafargeholcim.com
8	Mizu	Cimento	P	www.mizu.com.br
9	Tupi	Cimento	P	www.cimentotupi.com.br
10	Votorantim	Cimento	P	www.votorantimcimentos.com.br
11	Eletronuclear	Energia	E	https://www.eletronuclear.gov.br
12	Bahiagás	Energia	P	http://www.bahiagas.com.br
13	Cegás	Energia	P	http://www.cegas.com.br
14	Shellgas	Energia	P	http://www.shellgas.com.br
15	Naturgy	Energia	P	https://www.naturgy.com.br
16	Comgas	Energia	P	https://www.comgas.com.br
17	Bunge	Fertilizante	P	http://www.bunge.com.br
18	Cmoc Brasil Mineração, Indústria e Participações Ltda	Fertilizante	P	https://cmocbrasil.com/br
19	Vale Fertilizante	Fertilizante	P	http://www.vale.com/brasil
20	Heringer	Fertilizante	P	http://www.heringer.com.br
21	Iharabrás	Fertilizante	P	http://www.ihara.com.br

Tabela 11 (Continuação) – Consumidores de H₂ verde. Fonte: Elaboração própria.

	Empresa	Setor	(E)xistente / (P)otencial	Site
22	Mosaic Fertilizantes	Fertilizante	P	http://www.mosaicco.com.br
23	Fertipar	Fertilizante	P	https://www.fertipar.com.br
24	Yara Brasil	Fertilizante	P	https://www.yarabrasil.com.br
25	Galvani	Fertilizante	P	http://www.galvani.ind.br
26	Anglo American	Mineração	P	https://brasil.angloamerican.com
27	Mitsui & Co	Mineração	P	https://www.mitsui.com/br/pt
28	Vale	Mineração	P	www.vale.com
29	Braskem	Químico	E	https://www.braskem.com.br
30	Clariant	Químico	E	https://www.clariant.com/pt/Company
31	Oxiteno	Químico	E	http://www.oxiteno.com
32	Evonik Brasil Ltda.	Químico	E	https://central-south-america.evonik.com/pt
33	LANXESS	Químico	E	http://lanxess.com.br/pt/home
34	CSN	Siderurgia	E	www.csn.com.br
35	AcerlorMittal	Siderurgia	E	https://brasil.arcelormittal.com
36	Gerdau	Siderurgia	E	www.gerdau.com.br
37	Ternium	Siderurgia	E	https://br.ternium.com/pt
38	Nicrosol	Siderurgia	E	http://www.nicrosol.com.br
39	CMA CGM	Transporte	P	https://www.cma-cgm.com/local/brasil
40	SCHOTT Brasil Div. Vitrofarma	Vidro	E	https://www.schott.com/brazil/portuguese
41	Nadir Figueiredo	Vidro	E	https://www.nadir.com.br

3.6.3 Fornecedores de tecnologia

Neste segmento, objetivou-se mapear empresas que podem fornecer sistemas ou componentes tecnológicos ao longo da cadeia de valor, ou seja, da produção através de eletrólise, equipamentos como válvulas e bombas de hidrogênio até equipamentos de armazenamento e distribuição como tanques e cilindros, entre outros. Foram também consideradas neste segmento empresas que possuem capacidade desenvolvimento de soluções em hidrogênio, principalmente no setor de transportes e correlatos (ferroviário, aéreo, aquaviário e máquinas agrícolas). O resultado do mapeamento é apresentado na Tabela 12.

Durante a pesquisa, foi constatada a existência de grupos setoriais de trabalho que atuam no desenvolvimento de soluções, incluindo hidrogênio, como uma opção de reduzir a emissão de GEE. Alguns representantes de empresas atuam de forma conjunta através de organizações como a SAE BRASIL, onde profissionais e engenheiros trabalham em conjunto para propulsionar a tecnologia de hidrogênio para a mobilidade.

Além de empresas fornecedoras de equipamentos existem também grandes empresas internacionais, que possuem a capacidade de instalar plantas *turnkey*, incluindo planejamento, instalação e até operação e manutenção. Dentre estas empresas se destacam a Siemens Energy, ThyssenKrupp, Piel McPhy e MAN Energy Solutions.

Tabela 12 – Fornecedores de tecnologias de H₂ verde e PtX. Fonte: Elaboração própria.

	Empresa	Subsegmento	Site
1	3M	Equipamento	https://www.3m.com.br/3M/pt_BR/3m-do-brasil
2	Borgwarner (ex Gustav Wahler)	Equipamento	https://www.borgwarner.com/company/locations
3	Bürkert	Equipamento	https://www.burkert.com.br/pt
4	Busch do Brasil	Equipamento	https://www.buschvacuum.com/br/pt
5	Cummins	Equipamento	https://www.cummins.com.br
6	Eberspächer	Equipamento	https://www.eberspaecher.com/en/worldwide.html
7	EBM Papst	Equipamento	https://www.ebmpapst.com.br/pt_br
8	Elringklinger	Equipamento	https://www.elringklinger.de/de/unternehmen/standorte/piracicaba
9	Endress+Hauser	Equipamento	https://www.br.endress.com/pt/endress-hauser-grupo/endresshauser-em-um-relance/endress-hauser-brasil
10	Faurecia	Equipamento	https://www.faurecia.com/en
11	Festo	Equipamento	https://www.festo.com/cat/pt-br_br/products
12	Flutrol	Equipamento	https://www.flutrol.com.br
13	Freundenberg	Equipamento	https://www.freundenberg.com/company/locations
14	GardnerDenver	Equipamento	https://www.gardnerdenver.com/pt-br/gdproducts
15	Itochu Corporation	Equipamento	https://www.itochu.co.jp/en/about/network/latin_america/index.html
16	Johnson Matthey	Equipamento	https://matthey.com/en/about-us/contact-us
17	Kaco New Energy	Equipamento	https://kaco-newenergy.com/pt/home
18	Leoni	Equipamento	https://www.leoni.com/en/company/locations
19	Leser	Equipamento	www.leser.com.br
20	Liebherr	Equipamento	https://www.liebherr.com/de/deu/%C3%BCber-liebherr/liebherr-weltweit/brasilien/liebherr-in-brasilien.html?lang=pt
21	Mahle	Equipamento	http://www.br.mahle.com/pt/#
22	Mann+Hummel	Equipamento	https://www.mann-filter.com/en/mf-br/footer-menu/contact/brazil
23	Metalplan	Equipamento	https://metalplan.com.br/produtos/redes-de-ar-comprimido
24	Munk	Equipamento	https://www.munk.de/en/partner/brazil
25	Neuman & Esser Engenharia e Soluções Ltda.	Equipamento	https://www.neuman-esser.de/en/company/locations/brazil
26	Phoenix Contact	Equipamento	https://www.phoenixcontact.com/online/portal/br?urlile=wcm:path:/br/pt/web/home
27	Plastic Omnium do Brasil	Equipamento	https://www.plasticomnium.com/en
28	Robert Bosch	Equipamento	https://www.bosch-mobility-solutions.com.br/br
29	Rosenberger	Equipamento	https://www.rosenberger.com/br_pt/Mercados_Produtos/automotivo/automotive.php
30	Schaeffler	Equipamento	https://www.schaeffler.com.br/content.schaeffler.com.br/pt/index.jsp
31	Scheuermann & Heilig	Equipamento	https://www.sh-gmbh.de/pt/produtos
32	Steiger	Equipamento	http://www.staiger.com.br
33	Tracel	Equipamento	https://www.tracel.com.br
34	U.I. Lapp	Equipamento	https://lappbrasil.lappgroup.com
35	Vallourec	Equipamento	https://www.vallourec.com/pt-br/brazil

Tabela 12 (Continuação) – Fornecedores de tecnologias de H₂ verde e PtX. Fonte: Elaboração própria.

	Empresa	Subsegmento	Site
36	Vestas do Brasil	Equipamento	https://www.vestas.com
37	Viessmann	Equipamento	https://www.viessmann.pt/pt/o-grupo-viessmann.html
38	WEG	Equipamento	https://www.weg.net/institutional/BR/pt
39	WOBLEN WINDPOWER	Equipamento	http://www.wobben.com.br
40	Vopak	Equipamento	https://www.vopak.com/terminals/vopak-brazil-alemoa-terminal
41	Hytron	Integrador de Sistemas	https://www.hytron.com.br
42	MAN Energy Solutions	Integrador de Sistemas	https://brazil.man-es.com
43	Piel Mcphy	Integrador de Sistemas	http://www.piel.com.br
44	Siemens Energy	Integrador de Sistemas	https://www.siemens-energy.com/br/pt.html
45	TechnipFMC	Integrador de Sistemas	https://www.technipfmc.com/en/about-us
46	ThyssenKrupp	Integrador de Sistemas	https://www.thyssenkrupp-brazil.com/pt-br/empresa/segmentos/plant-technology/eletrolise
47	AGCO do Brasil Máquinas e Equipamentos Agrícolas Ltda.	Transportes	www.agco.com.br
48	Agrale S.A.	Transportes	www.agrale.com.br
49	Airbus – Helibras Helicópteros	Transportes	https://www.airbus.com/careers/our-locations/latin-america/brazil.html
50	Alstom - produtos e serviços para o setor de transporte ferroviário	Transportes	https://www.alstom.com/pt/alstom-no-brasil
51	Audi	Transportes	https://www.audi.com.br
52	AVL	Transportes	https://www.avl.com/-/avl-south-ameri-1
53	BMW	Transportes	https://www.bmw.com.br/pt/index.html
54	CAOA Montadora de Veículos S.A.	Transportes	www.caoa.com.br
55	Caterpillar Brasil Ltda.	Transportes	www.caterpillar.com.br
56	CNH Industrial	Transportes	https://www.cnhindustrial.com
57	DAF Caminhões Brasil Indústria Ltda.	Transportes	www.dafcaminhoes.com.br
58	Daimler/Mercedes-Benz	Transportes	https://www.daimler.com/karriere/ueber-uns/standorte/standort-detailseite-5251.html
59	Embraer - Embraer aviação	Transportes	https://embraer.com/br/pt
60	FCA Fiat Chrysler Automóveis do Brasil Ltda.	Transportes	www.fiat.com.br www.jeep.com.br
61	Ford Motor Company Brasil Ltda.	Transportes	www.ford.com.br
62	Foton Caminhões	Transportes	http://www.fotonmotors.com.br
63	General Motors	Transportes	www.chevrolet.com.br
64	Great Wall	Transportes	https://www.lexicarbrasil.com.br/great-wall
65	Honda	Transportes	www.honda.com.br
66	HPE Automotores do Brasil Ltda.	Transportes	www.mitsubishimotors.com.br www.suzukiveiculos.com.br
67	Hyundai	Transportes	www.hyundai.com.br

Tabela 12 (Continuação) – Fornecedores de tecnologias de H₂ verde e PtX. Fonte: Elaboração própria.

	Empresa	Subsegmento	Site
68	Jaguar e Land Rover Brasil Indústria e Comércio de Veículos Ltda.	Transportes	www.jaguarbrasil.com.br www.landrover.com.br
69	John Deere Brasil Ltda.	Transportes	www.deere.com.br
70	Kawasaki	Transportes	http://kawasakibrasil.com.br
71	Komatsu do Brasil Ltda.	Transportes	www.komatsu.com.br
72	Krempel	Transportes	http://www.dmibr.com
73	MAN Latin America Indústria e Comércio de Veículos Ltda.	Transportes	www.vwco.com.br
74	Marcopolo	Transportes	https://www.marcopolo.com.br
75	Mcdermott	Transportes	https://www.mcdermott.com/Where-We-Work/Central-South-America
76	Mercedes-Benz	Transportes	https://www.mercedes-benz.com.br
77	Michelin	Transportes	https://www.michelin.com.br
78	Mitsubishi Corporation	Transportes	https://www.mitsubishimotors.com.br
79	Nissan do Brasil Automóveis Ltda.	Transportes	www.nissan.com.br
80	Peugeot Citroën do Brasil Automóveis Ltda.	Transportes	www.psa-peugeot-citroen.com.br
81	Renault do Brasil S.A.	Transportes	www.renault.com.br
82	Scania Latin America Ltda.	Transportes	www.scania.com.br
83	Toyota	Transportes	www.toyota.com.br
84	Valeo	Transportes	https://www.valeoservice.com.br/pt-br
85	Volkswagen do Brasil Indústria de Veículos Automotores Ltda.	Transportes	www.volkswagen.com.br
86	Volkswagen Truck & Bus	Transportes	https://www.vwco.com.br
87	Volvo do Brasil Veículos Ltda.	Transportes	www.volvo.com.br
88	Wegmann Automotive	Transportes	https://www.wegmann-automotive.com/de/startseite

3.6.4 Prestadores de serviço

Foi realizada uma busca por prestadores de serviço com experiência comprovada no segmento de hidrogênio de verde. Por se tratar de um segmento ainda em desenvolvimento, o mapeamento neste segmento foi bastante limitado. Para fins deste estudo, entende-se que escritórios de advocacia ou financiadores não devem fazer

parte dessa categoria por se tratar de serviços secundários. Nesse sentido, foram listadas na Tabela 13 empresas de consultorias e de engenharia que já trabalham com o tema de descarbonização e possuem experiência com estudos de viabilidade ou gerenciamento de projetos relacionados ao setor.

Tabela 13 – Prestadores de Serviço de H₂ verde. Fonte: Elaboração própria.

Empresa	Descrição	Site
1 Base Energia Sustentável	Engenharia de projetos em energias renováveis.	http://www.basengenharia.com.br/base/node/10
2 Casa dos Ventos	A Casa dos Ventos é uma das pioneiras e principais investidoras no mercado de energia eólica do Brasil.	https://casadosventos.com.br/pt
3 FGV Energia	A FGV Energia desenvolve pesquisas, estudos e análises no setor energético, auxiliando organizações públicas, privadas e do terceiro setor na avaliação de investimentos e aplicações de recursos energéticos de maneira sustentável.	https://fgvenergia.fgv.br/fgv-energia
4 Future ATP Engenharia	Prestação de serviço de consultoria especializada a empresas públicas e privadas do sector da energia, em particular na área das energias renováveis e infraestruturas elétricas.	https://www.future-motion.eu/pt/unidades-de-negocio/energia
5 g2a Consultoria	A G2A Consultores foi criada pela associação de profissionais com experiência de mais de 15 anos no mercado de energias renováveis com foco nas áreas regulatória, institucional, mercado e novos negócios.	https://www.g2aconsultores.com.br
6 GEO-NET Consultoria	Campanhas de medição, micrositing, certificação de campanhas de medição de ventos e rendimento energético de projetos eólicos utilizando o modelo de fluxo aéreo FITNAH-3D em acordo com as exigências da EPE (Empresa de Pesquisa Energética).	http://geonetbrasil.com.br
7 HB-Soluções energéticas	Prestação de serviços de energia com foco na “Gestão de Energias Renováveis e Alternativas e Eficiência Energética”.	https://hbse.com.br
8 Hexagon	Mapeamento geográfico e integração de sistemas energéticos.	https://hexagon.com.br/about/hexagon-brazil
9 KWP Energia	Inovação e a utilização de fontes de energia limpas e renováveis para geração de energia elétrica no Brasil	https://www.kwpar.com.br
10 PSR Soluções e Consultoria em Energia	Serviços de consultoria técnica nos setores de energia elétrica e gás natural.	https://www.psr-inc.com/pt
11 RPA Consultoria	Consultoria técnica e econômica composta por renomados especialistas com mais de 20 anos de experiência na agroindústria canavieira.	https://rpaconsultoria.com.br
12 Sowitec	Desenvolvimento de projetos na área de energias renováveis.	https://www.sowitec.com/en/about
13 VETTA TECNOLOGIA S.A.	Centro de competência em digitalização industrial, com ênfase em tecnologias de eficiência e sustentabilidade.	https://vetta.digital/pt-br/sobre

3.6.5 Representações setoriais

Para esta categoria, foi realizada uma pesquisa sobre associações de representação setorial por se tratarem de potenciais interlocutores do tema de hidrogênio verde no Brasil. Todas as associações listadas na Tabela 14 foram abordadas e confirmaram interesse de seus associados no tema de hidrogênio verde.

Tabela 14 – Representações setoriais de H₂ verde. Fonte: Elaboração própria.

	Associação	Descrição	Site
1	ANFAVEA	Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores	http://www.anfavea.com.br
2	UBRABIO	União Brasileira do Biodiesel e Bioquerosene (Ubrabio)	https://ubrabio.com.br
3	ABEEOLICA	Associação Brasileira de Energia Eólica	https://abeeolica.org.br
4	ABSOLAR	Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica	http://www.absolar.org.br
5	ABH2	Associação Brasileira de Hidrogênio	http://abh2.com.br/index.php/pt/sobre-a-abh2
6	ABIMAQ	Associação Brasileira de Maquinas	www.abimaq.org.br
7	ABIOGAS	Associação Brasileira do Biogás	https://abiogas.org.br
8	ABREM	Associação Brasileira de Recuperação Energética de Resíduos	https://abren.org.br
9	SOBRATEMA	Associação Brasileira de Tecnologia para Construção e Mineração	https://www.sobratema.org.br
10	SINDIPEÇAS/ABIPEÇAS	Associação Brasileira da Indústria de Autopeças	https://www.sindipecas.org.br/home
11	SAE BRASIL	Sociedade de Engenharia da Mobilidade no Brasil	http://portal.saebrasil.org.br
12	ANPEI	Associação Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento das Empresas Inovadoras	http://anpei.org.br

3.6.6 Universidades e Centros de P&D

As universidades e centros de pesquisa e desenvolvimento (P&D) são organizações de grande relevância para consolidar o desenvolvimento de uma economia de hidrogênio verde, promovendo dessa forma novas tecnologias e apoiando na divulgação do tema e na formação profissional de mão de obra qualificada.

Para fins deste estudo, foram pesquisadas universidades que dentro do seu corpo acadêmico mantém pesquisas relacionados ao tema de hidrogênio verde e possuem publicações a respeito. Constatou-se pela pesquisa que as universidades que trabalham o tema são majoritariamente de origem pública. Além disso foram incluídos em tal listagem centros de pesquisa que atuam em pelo menos uma área no desenvolvimento de hidrogênio, como é caso do Parque Tecnológico Itaipu.

Da mesma forma, entende-se que a formação profissional possui grande relevância para o desenvolvimento de hidrogênio verde no Brasil, fato confirmado na pesquisa de opinião que alerta para essa temática, por ser vista como uma das principais barreiras pelas empresas para o desenvolvimento do setor de hidrogênio verde. Nesse sentido, foram também listados centros de formação profissional como o Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial (SENAI) como atores fundamentais na qualificação de mão de obra em tecnologias de hidrogênio verde no Brasil. As instituições mapeadas são apresentadas na Tabela 15.

Tabela 15 – Universidades e Centros de P&D de H₂. Fonte: Elaboração própria.

	Instituição	Área de Pesquisa	(E)xistente / (P)otencial	Site
1	Parque Tecnológico Itaipu	Núcleo de Pesquisa em Hidrogênio	E	https://www.pti.org.br/pt-br
2	GESEL	Mobilidade elétrica e introdução de hidrogênio	E	http://www.gesel.ie.ufrj.br
3	SENAI CIMATEC	Eficiência energética e indústrias sustentáveis	P	http://www.senaicimatec.com.br
4	Eletrobras Cepel	Laboratório de Células a Combustível	E	http://www.cepel.br/pt_br
5	Universidade Federal de Uberlândia	Produção de hidrogênio a partir da reforma de metano e etanol	E	http://www.ufu.br
6	Universidade Federal do Paraná	Laboratório de Catálise e Produção de Biocombustíveis – LabCatProBio	E	https://www.ufpr.br/portafulpr
7	GPMOT – Universidade de Santa Maria, RS	Grupo de Pesquisa em Motores, Combustíveis e Emissões	E	http://coral.ufsm.br/gpmot/index.php
8	UFRN/ Creation Research Group - Renewable Energies	Análise da competitividade da utilização do hidrogênio na mobilidade	E	https://ufrn.br
9	Embrapa – Empresa Brasileira da Pesquisa Agropecuária	Produção de hidrogênio e metano a partir de glicerol oriundo de biodiesel.	E	https://www.embrapa.br
10	Instituto SENAI de Inovação em Energias Renováveis	Energias renováveis	P	https://www.rn.senai.br/instituto-de-inovacao-em-energias-renovaveis
11	Universidade Federal de Itajubá	Instituto de Sistemas Elétricos e Energia-ISEE	E	https://unifei.edu.br
12	Universidade Estadual de Campinas	Laboratório de Hidrogênio LH2	E	https://portal.ifi.unicamp.br/dfa/lh2
13	Universidade Federal do Rio de Janeiro/COPPE	LabH2 - Laboratório de Hidrogênio da COPPE	E	http://www.labh2.coppe.ufrj.br/index.php/pt
14	Universidade Federal de São Carlos	Departamento de Tecnologia Agroindustrial e Socioeconomia Rural	E	https://www.vico.ufscar.br
15	Universidade Federal de São Paulo	Research Center for Gas Innovation	E	https://www.rcgi.poli.usp.br/pt-br
16	Universidade Federal do Ceará	Centro de Tecnologia	E	https://ct.ufc.br/pt

3.6.7 Considerações

A partir do mapeamento realizado pode-se aferir que o Brasil conta atualmente com a atuação de relevantes atores nacionais e internacionais em todos os elos da cadeia produtiva de hidrogênio, seja no ramo da produção, fornecimento de tecnologia, componentes e serviços agregados ou ainda no consumo. Em relação a esse último, destaca-se a listagem de potenciais consumidores mapeados, além da demanda atual ainda considerada baixa no país. Com o crescimento da demanda global por

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

4. Pesquisa com os principais atores no mercado brasileiro de hidrogênio

Este capítulo apresenta os resultados de uma ampla pesquisa de opinião realizada com os principais atores diretos e indiretos da cadeia de valor do hidrogênio. São trazidas informações e percepções relevantes sobre a composição da cadeia produtiva no Brasil, bem como sobre as vantagens, desafios e recomendações para o desenvolvimento de uma economia de hidrogênio no país.

4.1 Introdução

Com a intenção de reunir informações e percepções relevantes para o tema de hidrogênio verde, realizou-se em paralelo ao mapeamento apresentado no Item 3.6 do presente estudo, uma pesquisa ampla com os principais dos stakeholders da cadeia produtiva de hidrogênio no Brasil. As perguntas realizadas objetivaram mapear a opinião e expectativas dos respondentes sobre a introdução de hidrogênio verde na matriz energética, assim como sobre o grau de maturidade e desafios na introdução de hidrogênio verde em seus processos produtivos. Participaram da pesquisa representantes de toda a cadeia produtiva de hidrogênio verde, conforme apresentando na Figura 30.

A pesquisa foi realizada via questionário online e divulgada em diversos canais para obtenção um retorno amplo e representativo. Nesse sentido, os principais meios de divulgação utilizados foram:

- Mailing direto para as empresas listados no mapeamento dos principais stakeholders (vide Item 3.6 do presente estudo);

- Distribuição a associados de representações setoriais relevantes para o tema (Associação Brasileira da Indústria de Máquinas e Equipamentos (ABIMAQ), Associação Brasileira de Energia Eólica (ABEEólica), Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (ABSOLAR), SAE BRASIL entre outros);
- Divulgação em eventos como webinários relacionados ao tema, bem como no Congresso Brasil-Alemanha de Hidrogênio, realizado em outubro de 2020.

No total, estima-se uma divulgação ampla para aproximadamente 1.000 empresas ou instituições. Desse total enviado, foram recebidas um total de 142 respostas. Após exclusão de duplicadas foram qualificadas 116 respostas (82% do total recebido) para a análise da pesquisa.

A Figura 31 indica a estrutura geral seguida no questionário enviado as empresas. É importante ressaltar que o questionário previu um direcionamento de perguntas baseado na área/setor de atuação de cada respondente, conforme abaixo:

- Produtor de hidrogênio;
- Consumidor de hidrogênio;
- Fornecedor de equipamentos na área de hidrogênio;
- Prestador de serviços na área de hidrogênio;
- Representação setorial;
- Academia (Universidades, Centros de Pesquisa e afins).

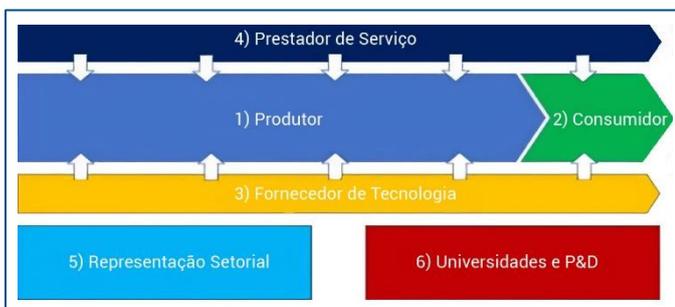


Figura 30 – Principais atores da cadeia de valor de hidrogênio.
Fonte: Elaboração própria.

4.2 Principais resultados obtidos

Para a análise dos resultados faz-se importante considerar que um questionário online é geralmente respondido por pessoas que já possuem certo interesse no assunto e, dessa forma, alguma ligação ao tema.

Quanto à origem das empresas e demais participantes na pesquisa (todas com atuação no mercado brasileiro) obteve-se a seguinte distribuição:

- 70 respostas foram originadas por entidades/empresas brasileiras;
- 28 por empresas alemãs;
- 10 por empresas europeias;
- 2 por empresas americanas;
- 6 por empresas de outros países não listados na pesquisa ou não informado.

Com relação ao faturamento como indicativo do porte das empresas respondentes a Figura 32 aponta para uma amostragem diversa e relevante para a análise, uma vez que tanto um volume considerável de empresas de pequeno porte e com faturamento anual menor que R\$ 1 milhão (26 empresas ou aproximadamente 22,4% das empresas) quanto de grande porte e faturamento acima de R\$ 500 milhões/ano (36 empresas ou 31%) participaram da pesquisa.

O número de empresas respondentes por categoria mostra uma distribuição conforme apresentado na Figura 33. Destacam-se a quantidade de respondentes com origem na academia e instituições de pesquisa, indicando uma forte atuação do setor na área de hidrogênio. A questão 40 do questionário (Q40) indica que as 23 instituições de PD&D que responderam a essa pergunta indicaram de 1 a 5 grupos de pesquisa em hidrogênio nas respectivas instituições.

Em relação à conscientização, as empresas ou entidades que responderam à pesquisa de opinião já possuem alguma sensibilização sobre o meio ambiente ou o uso de gases de efeito estufa, como pode ser visto na Figura 34 para os resultados da questão “Na sua opinião, qual das respostas abaixo mais se enquadra com o engajamento de sua empresa para uma recuperação verde (*Green Recovery*), ou seja, repensar o modelo de negócio atual e trabalhar para uma recuperação econômica mais sustentável?”.

Ainda que não mencionado diretamente na pergunta sobre o contexto pós-pandemia de COVID-19, ressalta-se que as empresas estão preocupadas, independentemente da conjuntura econômica originada pela Pandemia do COVID-19, com a sua responsabilidade socioambiental, ou seja, repensar o modelo de negócio atual e trabalhar para uma recuperação econômica mais sustentável, uma vez que se obteve uma distribuição de aproximadamente 80% das empresas com algum interesse (das 87 respondentes).

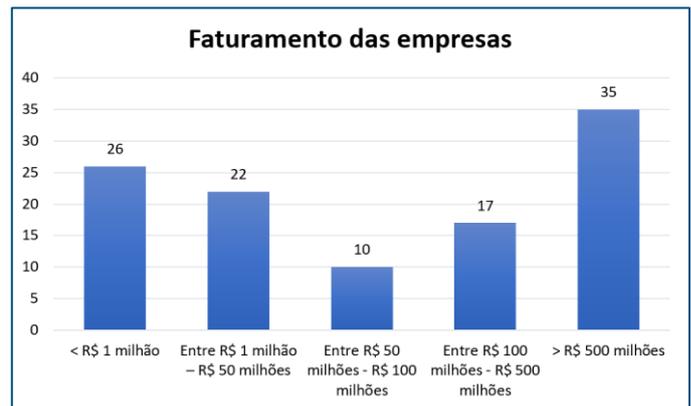


Figura 32 – Faturamento das empresas participantes. Fonte: Elaboração própria.

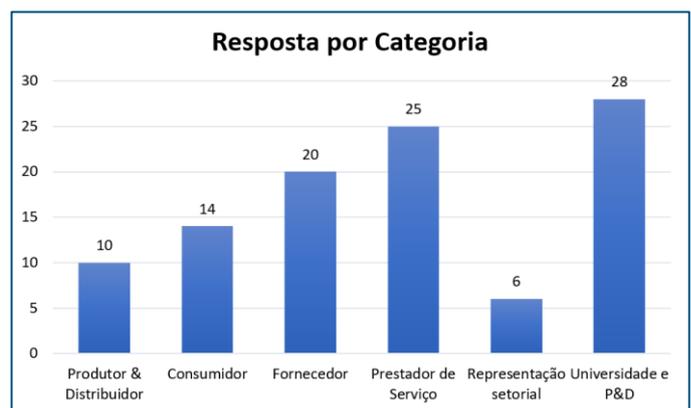


Figura 33 – Respostas ao questionário por categoria. Fonte: Elaboração própria.



Figura 34 – Intenção sobre recuperação verde. Fonte: Elaboração própria.

Nesse sentido, o maior índice de respostas sinalizou afirmações como “Um novo modelo de negócio está em avaliação” ou “O novo modelo de negócio faz parte do planejamento dos próximos anos” ou ainda “Já existe um plano de ação”. Aproximadamente 20% das respondentes indicaram que ou “Não há intenção” ou “A recuperação econômica é prioridade”.

Foram conduzidas algumas perguntas sobre a **Produção e Aplicação de Hidrogênio verde**, tais como: “Na sua empresa, qual é o nível de conhecimento sobre o hidrogênio verde e sua aplicação?” e “Qual o interesse da sua empresa na produção de hidrogênio verde “in loco”?”. Na Figura 35 percebe-se que 53% das empresas e instituições dizem-se “cientes e engajadas no tema” ou então “cientes, mas sem planos de aplicação”. Combinando esta pergunta com a questão na Figura 36 sobre a existência de interesse pela empresa na produção de hidrogênio verde “in loco”, ou seja, investir em uma instalação de geração no local da empresa, praticamente o mesmo percentual responde que está em implementação (5 respostas), buscando fundos de investimentos (13 respostas) ou elaborando um estudo de viabilidade (26 respostas). Esse resultado demonstra a existência de um grande interesse em uma geração própria e descentralizada de hidrogênio verde.

A Figura 37 apresenta uma comparação sobre o nível de conhecimento no tema de hidrogênio verde com a categoria dos respondentes, na qual é possível perceber que as universidades e os prestadores de serviços são os que afirmaram com maior frequência estarem cientes e engajados no tema (16 respostas no total). Além disso, as empresas nas categorias de produtoras, fabricantes de equipamentos, consumidores e prestadores de serviço somam um total de 43 respostas afirmativas sobre a ciência e engajamento no tema ou ainda em iniciação no tema, correspondendo a aproximadamente 60% do total de respostas para esses dois itens.

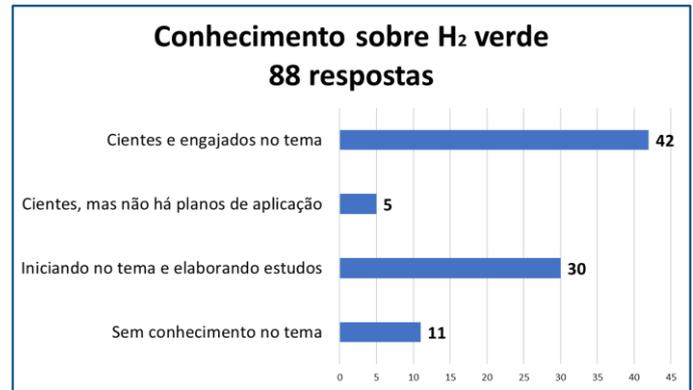


Figura 35 – Conhecimento sobre H₂ verde. Fonte: Elaboração própria.

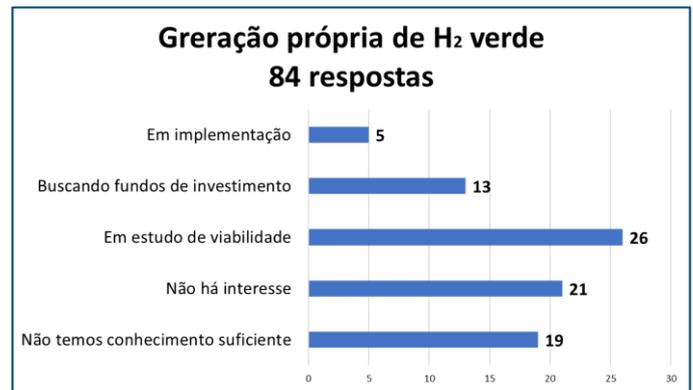


Figura 36 – Interesse em geração própria. Fonte: Elaboração própria.

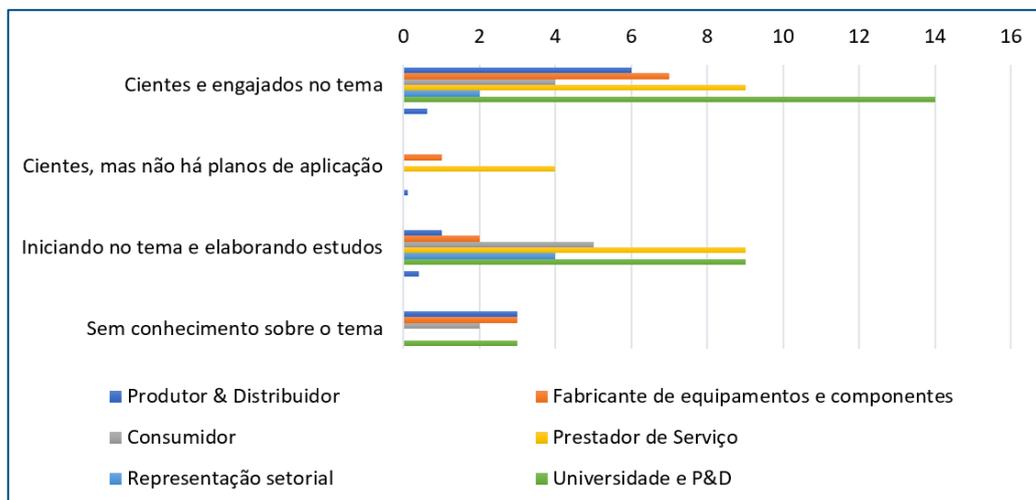


Figura 37 – Conhecimento do tema por categoria de empresa. Fonte: Elaboração própria.

Já nas perguntas relacionadas diretamente ao hidrogênio verde, destaca-se o resultado sobre a competitividade do Brasil no mercado global de hidrogênio verde (Figura 38). Nesse sentido, na percepção de quase 76% dos respondentes o Brasil está “muito atrasado” ou “atrasado” perante a atuação de outros países no mercado internacional de hidrogênio. O elevado percentual indica a necessidade de desenvolvimento de políticas públicas impreteríveis que forneçam um ambiente técnico, regulatório e tecnológico favorável para que o país possa buscar um posicionamento no promissor mercado global de hidrogênio verde.

Partindo da hipótese de que empresas só investem quando há um risco controlável e um retorno do capital investido interessante (custo de oportunidade⁵⁹), o questionário abordou o tema sobre a perspectiva de competitividade do hidrogênio verde para fins comerciais frente a outras tecnologias. Nesse quesito, as respostas indicam uma visão mais otimista dos respondentes: 30% acreditam que o hidrogênio verde possa se tornar comercialmente competitivo em até 5 anos e 44% informaram que a competitividade se desenvolverá em um prazo entre 5 a 10 anos, ou seja, até o ano de 2030 (Figura 39). Nesse sentido, a percepção dos respondentes está em perfeita consonância com as estimativas de redução de custos e ganho de competitividade do hidrogênio verde frente a outras fontes energéticas, conforme apresentado no Item 1.6 do presente estudo, indicando que os respondentes possuem um bom grau de conhecimento sobre as perspectivas e tendências para o hidrogênio verde não apenas em nível nacional, mas também internacional.

No que tange o porte das empresas e outras instituições respondentes que opinaram sobre essa questão, a Figura 40 demonstra que os respondentes com faturamento abaixo de R\$ 1 milhão por ano são os que opinaram com maior frequência sobre o hidrogênio verde se tornar comercialmente competitivo em dois a cinco anos. Já a maioria das empresas com faturamento acima de R\$ 500 milhões por ano acredita que o hidrogênio verde se tornará competitivo em um prazo de 5 a 10 anos.

Para a orientação do desenvolvimento de um *roadmap* ou estratégia de hidrogênio para o Brasil é de grande relevância conhecer a percepção da indústria sobre barreiras e quais incentivos (adicionais) poderiam fomentar o desenvolvimento de uma economia de hidrogênio no país. A Figura 41 apresenta os resultados compilados de 75 respondentes para o questionamento “Atualmente, como classificaria as barreiras para a aplicação e desenvolvimento do hidrogênio verde na sua empresa?” solicitando para cada item uma classificação através das opções “1- Muitas barreiras; 2- Algumas barreiras; 3- Sem barreiras”.



Figura 38 – Competitividade brasileira no mercado mundial de H₂ verde. Fonte: Elaboração própria.

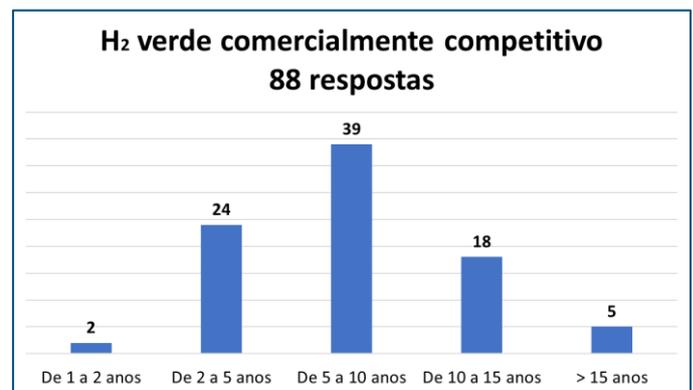


Figura 39 – Expectativa para o H₂ verde se tornar comercialmente competitivo. Fonte: Elaboração própria.

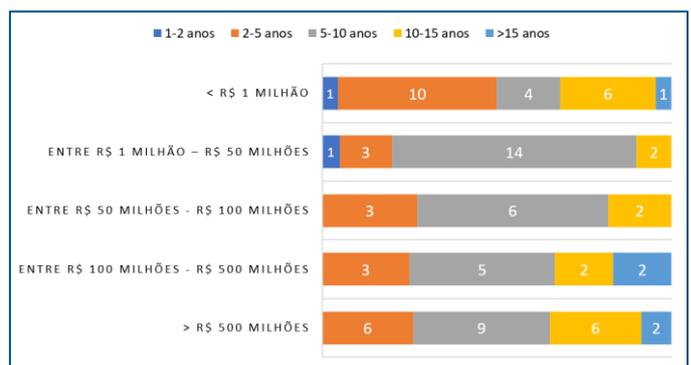


Figura 40 – Expectativa para o H₂ verde se tornar comercialmente competitivo por porte do respondente. Fonte: Elaboração própria.

⁵⁹ Expressão utilizada na área da economia para indicar o custo de uma decisão ou transação em termos das oportunidades renunciadas para que aquela decisão ou transação se efetivasse, considerando que toda aplicação de recursos pode ter uma destinação alternativa. Disponível em: <https://www.dicio.com.br/custo-de-oportunidade/>. Acesso em 07.11.2020.

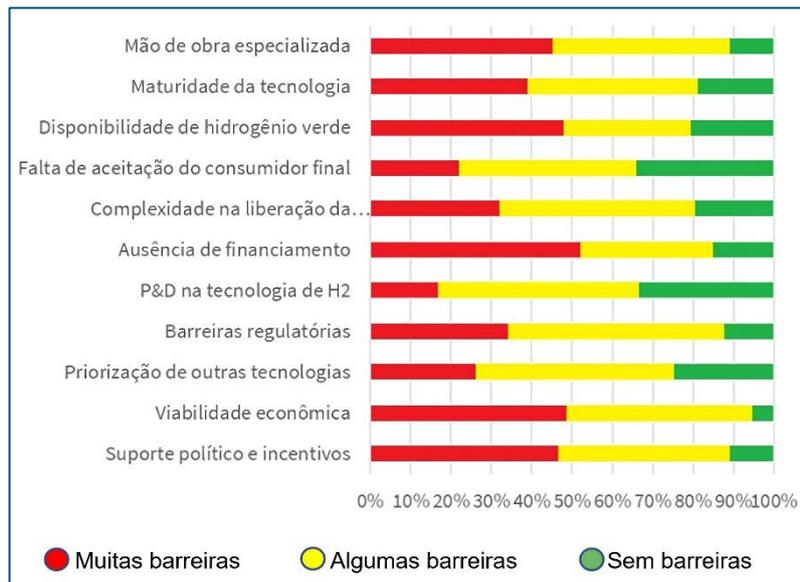


Figura 41 – Percepção sobre as principais barreiras. Fonte: Elaboração própria.

De maneira geral as seguintes conclusões sobre o quesito de barreiras ao hidrogênio verde podem ser aprendidas:

- A ausência de suporte político e incentivos são vistos como as maiores barreiras para o desenvolvimento de hidrogênio verde no Brasil;
- Da mesma forma, a existência de muitas barreiras em decorrência a ausência de viabilidade econômica e de fontes de financiamento foram apontadas por cerca de 50% dos respondentes;
- Além disso, uma mão de obra especializada precisa ser desenvolvida no país para promover a redução de barreiras de desenvolvimento desse mercado no país;
- Por fim, a grande maioria dos respondentes informaram existir nenhuma ou poucas barreiras quanto à aceitação do consumidor final às tecnologias de hidrogênio bem como quanto às iniciativas de pesquisa e desenvolvimento.

Ainda no quesito **Barreiras e Incentivos**, foi realizada a seguinte pergunta: “Quais os incentivos necessários para que sua empresa possa entrar no mercado de hidrogênio verde?” solicitando novamente uma avaliação por priorização em uma escala de 1 a 6, sendo “1” o mais necessário, e “6” o menos necessário. No total 73 participantes opinaram sobre essa questão, cujos resultados estão dispostos na Figura 42.

Nesse quesito obteve-se as seguintes conclusões:

- Os incentivos de maior necessidade apontados por cerca de 20% a 25% dos respondentes para que as empresas iniciem atividades relacionadas ao hidrogênio verde, são os de cunho fiscal, financeiro e de formação profissional. Essa indicação coincide com a questão previa do questionário sobre

barreiras, a qual também apontou para a ausência de financiamento e de mão de obra técnica qualificada como questões de ordem prioritária para o desenvolvimento do mercado de hidrogênio no país;

- Apenas cerca de 10% dos respondentes vislumbram a questão da taxa de emissões de CO₂ e subsídios no preço de comercialização do hidrogênio verde como incentivos de ordem prioritária.

4.3 Considerações adicionais sobre os resultados obtidos

De maneira geral, para os itens relacionados ao desenvolvimento de um mercado de hidrogênio verde no Brasil a pesquisa trouxe outros resultados relevantes a serem considerados, conforme dispostos a seguir:

- De um total de 87 respondentes, 32% apontaram a geração energética e outros 33% a descarbonização do setor de transportes como aplicações mais promissoras para utilização de hidrogênio verde no Brasil;
- Sob a ótica das vantagens estratégicas para o desenvolvimento de uma economia de hidrogênio verde no Brasil, de um total de 88 respondentes, aproximadamente 80%, acreditam que uma das principais vantagens estratégicas consiste na otimização da utilização de fontes de energia renováveis para fins energéticos (solução para intermitência na capacidade de geração e aproveitamento do excedente de energia).

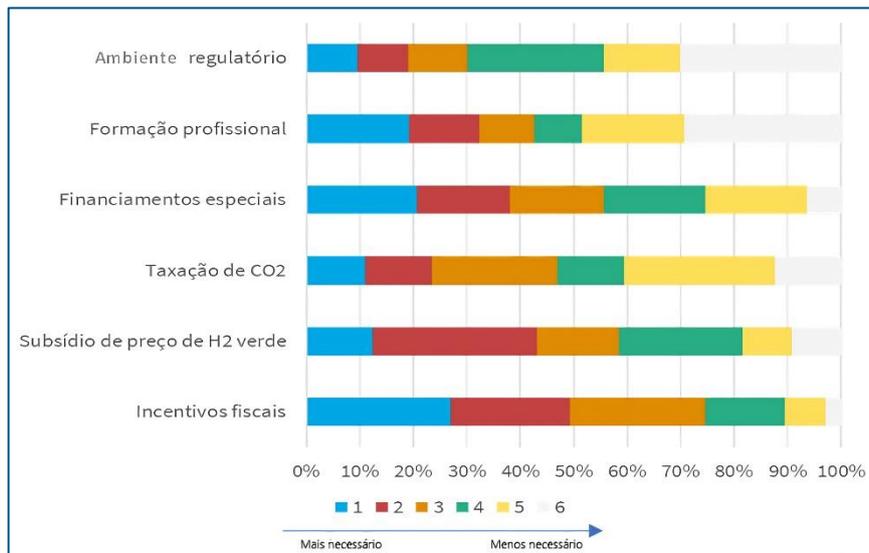


Figura 42 – Incentivos necessários. Fonte: Elaboração própria.

Por se tratar de uma questão de múltipla escolha, na segunda posição, apontado por cerca de 65% dos respondentes, configura a abertura de um novo mercado de exportação de hidrogênio verde para o país assim como a possibilidade de descarbonização do setor de transportes. Logo na sequência, apontado por 60% dos respondentes, configura a oportunidade de descarbonização do setor industrial. Os itens “descarbonização do setor de geração elétrica” e “geração de energia em sistemas isolados” foram as vantagens menos apontadas pelos respondentes.

- A partir da análise da questão “Na sua empresa, qual é o nível de conhecimento sobre o hidrogênio verde e sua aplicação?” pode-se aferir que a tecnologia do hidrogênio verde está sendo abordada como tema estratégico na maioria das empresas respondentes (cerca de 80% dos 87 respondentes).

- Sobre a pergunta: “Sua empresa presta serviço para qual área?” 16 empresas dos 25 prestadores de serviços respondentes informaram prestar serviços na área de consultoria em energias renováveis;
- Das 28 universidades respondentes, 25 possuem de 1 a 5 projetos na área de hidrogênio, o que confirma a existência de diversos projetos em andamento no país no campo da pesquisa, desenvolvimento e aplicação das tecnologias de hidrogênio.

Em geral, a pesquisa demonstra que as empresas ou instituições participantes não apenas conhecem o assunto de hidrogênio verde, mas estão também avaliando formas como de aproveitar este *momentum* na própria empresa e participar ativamente no desenvolvimento de uma economia de hidrogênio verde sustentável (vide respostas à pergunta “Qual o interesse da sua empresa na produção de hidrogênio verde “in loco”?”). Os resultados a todas as perguntas realizadas são apresentados em detalhe no Anexo I deste estudo.

Alguns resultados relevantes para as questões específicas realizadas para cada setor são dispostos as seguir:

- Quanto à produção de hidrogênio no Brasil, 70% responderam que a produção em suas empresas é de até 1 milhão de m³/ano (7 respondentes);
- De um total de 109 respondentes, 98 (cerca de 90%) informaram que o faturamento da sua empresa com H₂ é de até 10%, o que indica a ainda baixa participação do hidrogênio na composição do faturamento das empresas;

Por fim, é importante ressaltar que o mapeamento da indústria e dos principais atores acadêmicos e institucionais (Item 3.6) e a pesquisa de opinião atuaram como ações complementares entre si, resultando em informações extremamente relevantes sobre a composição da cadeia produtiva no Brasil bem como sobre as vantagens, desafios, e recomendações para o desenvolvimento de uma economia de hidrogênio no Brasil, os quais serão detalhados no Capítulo 5 deste estudo.

5. Recomendações para o desenvolvimento de uma economia de hidrogênio verde no Brasil

O presente capítulo dispõe em uma análise SWOT as principais informações reunidas durante a elaboração do presente estudo sobre o desenvolvimento de um mercado nacional e de exportação de hidrogênio verde brasileiro. O capítulo é encerrado com uma síntese sobre os principais desafios bem como com recomendações para o desenvolvimento de uma economia de hidrogênio verde no país.

5.1 Análise SWOT

A partir da reunião de uma vasta quantidade de informações por meio de entrevistas, pesquisa com os stakeholders e literatura para a realização do presente estudo, desenvolveu-se uma análise SWOT (*Strengths, Weaknesses, Opportunities and Threats*; Forças, Oportunidades, Fraquezas e Ameaças em português) para sintetizar os principais pontos fortes e pontos de atenção no desenvolvimento de um mercado nacional e de exportação de hidrogênio verde brasileiro.

Em uma análise do tipo SWOT as categorias “forças” e “fraquezas” reúnem fatores internos nos quais o objeto de análise possui certa influência ou gerência direta. Já os itens listados nas categorias “oportunidades” e “ameaças” são normalmente fatores externos sobre os quais o objeto de análise possui nenhuma ou pouca capacidade de influência direta.

A seguir são listados os principais pontos positivos e de atenção, dispostos nas categorias da matriz SWOT (Tabela 16).

Tabela 16 – Análise SWOT H₂ verde. Fonte: Elaboração própria.

FATORES INTERNOS	
Strengths (Forças)	Weaknesses (Fraquezas)
Diversidade de fontes de energia renováveis (hidrelétrica, eólica, fotovoltaica, biomassa).	Mercado de gás natural em evolução no Brasil, sob a ótica de ausência de previsão de regulamentação que permita a injeção de H ₂ na rede.
Condições climáticas e geográficas favoráveis para a produção de H ₂ verde em larga escala.	Grandes distâncias para transporte de H ₂ .
Facilidade de escoamento da produção (extensão da costa litorânea).	Mercado atual de H ₂ é pequeno.
Redução dos custos de geração de energia a partir de fontes renováveis.	Extensão reduzida da malha de gasodutos, concentrada majoritariamente na região litorânea.
Presença de empresas em toda cadeia de valor de H ₂ , incluindo de fornecedores aptos a produzir eletrolisadores e reformadores (vide projetos realizados nas chamadas estratégicas de P&D da Aneel com tecnologia nacional).	Legislação inexistente no Brasil.
Interesse político crescente e primeiras iniciativas (por exemplo, PROH ₂).	Ausência de H ₂ na matriz energética.
Diversidade de centros de pesquisa e laboratórios no país dedicados ao tema.	Pequeno volume de programas estruturantes: hidrogênio e fontes renováveis (fotovoltaica, eólica e biomassa).
Compromisso e colaboração internacional do governo brasileiro (IPHE, ISO).	Falta de legislação e incentivos.
Existência de representação setorial (ABH ₂).	Pequeno volume de investimentos quando comparados a países com estratégias definidas para o H ₂ verde.
	Poucos projetos de demonstração comercial em andamento.
	Ausência de escala de produção de equipamentos nacionais (eletrolisadores entre outros).
	Capacitação profissional técnica inexistente (atualmente limitada a P&D).

Tabela 16 (Continuação) – Análise SWOT H₂ verde. Fonte: Elaboração própria.

FATORES INTERNOS (continuação)	
Strengths (Forças)	Weaknesses (Fraquezas)
Aumento da consciência socioambiental por parte das potenciais empresas consumidoras. Financiamento público de projetos de P&D das tecnologias de hidrogênio (ex. armazenamento e mobilidade elétrica) via Programa e Chamadas Estratégicas de P&D ANEEL.	(Ainda) elevado custo da tecnologia de célula de combustível, disponibilidade e custo do hidrogênio.
Histórico de sucesso na implementação de projetos relacionados ao tema e diversos projetos em andamento.	Necessidade de construir nova infraestrutura para o H ₂ (armazenamento e distribuição), infraestrutura limitada relacionada ao gás natural.
Reconstrução de uma indústria de fertilizantes sustentável no país a partir da amônia verde, reduzindo dependência externa do insumo agrícola.	Ritmo lento na adoção de tecnologia (do laboratório ao mercado).
	Endividamento público do país em patamares inéditos, com possibilidade de redução dos investimentos públicos em novas tecnologia.
FATORES EXTERNOS	
Opportunities (Oportunidades)	Threats (Ameaças)
Comprometimento dos países no cumprimento das metas de descarbonização pactuadas (Acordo de Paris).	Concorrência com outros países da América Latina e do mundo no fornecimento de H ₂ verde.
<i>Momentum</i> no cenário internacional do H ₂ verde como tecnologia viável para a descarbonização das economias.	Agilidade de outros governos tais como Chile e Austrália no planejamento e implementação de ações estruturantes em toda a cadeia de valor para produção de H ₂ verde para exportação e consumo local.
Demanda do mercado mundial para aquisição do H ₂ verde.	Percepção brasileira do hidrogênio como uma tecnologia disruptiva do futuro (vide PNE 2050) enquanto o cenário global vislumbra um crescimento do mercado com tecnologias de H ₂ em larga escala já 2040.
A utilização de hidrogênio verde como armazenamento de energias renováveis (hidrelétrica, solar fotovoltaica e eólica).	Lei de Gás Natural (PL da abertura do mercado de gás).
Utilização do <i>boom</i> fotovoltaico e eólico no Brasil para desenvolver hidrogênio verde e impulsionar a geração distribuída no país.	Custo Brasil: regulamentação, burocracia e falta de infraestrutura.
Abertura do mercado eólica offshore, apresentando novo potencial para geração de H ₂ verde.	Baixo crescimento da economia brasileira e elevado endividamento da máquina pública, possivelmente impactando no volume de investimentos públicos e privados no H ₂ , bem como reduzindo a demanda consumidora pelo produto.
Geração distribuída de energia elétrica.	Escassez de linhas de financiamento e programas para o desenvolvimento de um mercado de H ₂ verde (atual concentração nos programas de P&D).
Desenvolvimento de um mercado consumidor local de H ₂ verde como alternativa/complemento ao mercado exportador.	
Interesse crescente da indústria brasileira no H ₂ sustentável – oportunidade de alavancagem de investimentos do setor privado.	
Numerosas aplicações potenciais: por exemplo produção de hidrogênio verde e combustíveis verdes, eletrificação, mobilidade.	
Acoplamento setorial: pilha de combustível pode beneficiar setores industriais relevantes para a economia brasileira existentes (mineração, químico, siderúrgico).	
Transição para uma economia de baixo carbono: menor dependência dos combustíveis de origem fóssil e maior segurança energética.	
Mercado de gás natural em evolução no Brasil, sob a ótica de extensão da malha de gasodutos com potencial para injeção e/ou mistura de H ₂ ao gás natural.	

5.2 Síntese dos principais desafios e recomendações

É necessário sintetizar os principais desafios que o Brasil possivelmente enfrentará na consolidação de um mercado interno e exportador de hidrogênio verde, bem como apresentar recomendações com base na literatura e nos exemplos de outras “*hydrogen societies*”.

Em relação aos principais desafios que o Brasil enfrentará para o desenvolvimento de uma economia de hidrogênio estão as questões regulatórias, tecnológicas e de infraestrutura (MME/EPE, 2020a, p. 188-189). No que tange os aspectos regulatórios, há necessidade de criação de normatização nacional para o armazenamento, a distribuição e a conversão do hidrogênio (CGEE, 2017). Questões de certificação e padronização quanto à origem do hidrogênio (fóssil e renovável) e dos demais processos relacionados também são relevantes quando considerados os aspectos econômicos e de comercialização do gás, conforme literatura relacionada. Em relação aos aspectos tecnológicos, diversas temáticas tais como o armazenamento e logística do gás ainda precisam evoluir para apresentação de soluções tecnológicas economicamente viáveis. No entanto, de acordo com a EPE (2021, p. 19), “para além da normatização de condições de segurança e do desenho e regulação de mercado, o principal desafio para o desenvolvimento do uso energético do hidrogênio é alcançar os níveis de competitividade com outras fontes a partir da redução de seus custos”.

A questão da competitividade do hidrogênio, principalmente de origem renovável, não existe apenas no Brasil, mas também em escala global um dos fatores de maior criticidade para o desenvolvimento de economias de hidrogênio. Conforme mencionado no Item 1.6 do presente estudo acredita-se que a partir do volume de investimentos em P&D e projetos comerciais, que já estão em andamento somado aos que estão sendo projetados ao longo dos próximos anos em nível mundial, o hidrogênio, inclusive de origem renovável, tende se tornar competitivo frente a outras fontes. Contribui também para um ambiente favorável para o desenvolvimento de economias de hidrogênio um maior comprometimento socioambiental (incluindo com uma profunda descarbonização) por parte dos governos e demais instituições, assim como da iniciativa privada, a qual vem aderindo sistematicamente à agenda ESG, inclusive para viabilização da atração de investimentos qualificados.

Mediante aos desafios aqui apresentados, é importante apresentar as recomendações realizadas aos governos pelas instituições *Hydrogen Council* e IEA, ambas de grande reconhecimento mundial nas temáticas de hidrogênio e descarbonização.

Aos formuladores de políticas, o *Hydrogen Council* (2017) recomenda as seguintes ações para a consolidação das tecnologias de hidrogênio como elemento chave para o desenvolvimento econômico e descarbonização das economias⁶⁰:

1. Implementar políticas estáveis e de longo prazo para orientar a transição energética em todos os setores (energia, transporte, indústria e residencial).
2. Desenvolver políticas de coordenação e incentivo para fomentar a implantação antecipada de soluções de hidrogênio e gerar investimentos suficientes do setor privado. Essas políticas devem complementar as políticas setoriais e fornecer ferramentas para capturar os benefícios do hidrogênio.
3. No setor de transportes, garantir forte coordenação entre governos (para orientação), fabricantes de automóveis (para produzir e comercializar veículos movidos a célula de combustível), provedores de infraestrutura (para investir em infraestrutura de produção, abastecimento e distribuição) e consumidores (para aquisição de veículos movidos a célula de combustível).
4. Assegurar que o mercado de energia efetue reformas efetivamente em termos de tarifas de geração, distribuição, remuneração e levar em consideração os benefícios que o hidrogênio pode oferecer ao sistema energético, como por exemplo, solução para resolver a intermitência do sistema.
5. Fornecer instrumentos financeiros para alavancar o investimento privado com o apoio de garantias públicas, para mitigar o risco de mudanças antecipadas.
6. Facilitar a padronização de normas industriais entre regiões e setores para as tecnologias de hidrogênio e aproveitar os efeitos de produção em escala para reduzir custos.

⁶⁰ Para infográfico, acesse: https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2019/02/HC_PolicyMakers_FINAL.pdf.

A IEA (2019b) também destaca a importância da ampliação do uso do hidrogênio verde, de forma a contribuir para a redução das emissões de GEE. Dessa forma, são apresentadas quatro principais recomendações para aumentar a oferta e demanda de hidrogênio nos países.

1. Substituição do hidrogênio cinza pelo verde no uso industrial.
2. Injetar hidrogênio nas redes de gás natural, conseguindo com isso aproveitar a infraestrutura existente contribuindo para a redução de emissões e ganhando escala na produção de hidrogênio verde para reduzir custos.
3. Utilizar o hidrogênio na eletromobilidade, com pilhas a combustível.
4. Exportação do hidrogênio, ou seja, expandir o uso de hidrogênio através de rotas internacionais.

Tais recomendações oferecem oportunidades de alavancagem para aumentar a oferta e a demanda de hidrogênio, com base nas indústrias, infraestrutura e políticas existentes. Cabe aos governos e demais interessadas identificar quais delas oferecem o maior potencial de curto prazo considerando as particularidades geográficas, industriais e de sistemas de energia dos países, conforme alguns exemplos apresentados a seguir:

1. Tornar os polos industriais centros nervosos para aumentar o uso de hidrogênio verde. Hoje, grande parte da produção de refino e produtos químicos que utiliza hidrogênio à base de combustíveis fósseis já está concentrada em zonas industriais costeiras ao redor do mundo. Incentivar essas plantas a mudar para uma produção mais limpa de hidrogênio reduziria as emissões de GEE e o impacto ambiental em geral. Essas grandes fontes de geração de hidrogênio também podem abastecer navios e caminhões, e alimentar outras instalações industriais próximas, tais como usinas siderúrgicas.
2. Utilização da infraestrutura existente. A introdução de hidrogênio limpo para substituir apenas 5% do volume de suprimento de gás natural dos países, aumentaria significativamente a demanda por hidrogênio e reduziria os custos de produção e distribuição do gás.
3. Expandir o hidrogênio no transporte através de frotas e veículos de transporte público. O uso de carros de passeio, caminhões e ônibus, pode tornar os veículos a pilha a combustível mais competitivos.
4. Desenvolver as primeiras rotas de transporte internacional de comércio de hidrogênio com tais tecnologias atuais disponíveis, tais como a amônia verde e o LOHC.

O mesmo relatório da IEA (2019b) também apresenta sete recomendações para governos e empresas com o objetivo de alavancar o uso do hidrogênio verde e aproveitar o seu potencial a longo prazo. As recomendações são descritas a seguir:

1. Estabelecer metas de contribuição concretas para o hidrogênio nas estratégias de energia a longo prazo (planejamentos energéticos). Governos nacionais, regionais e municipais podem orientar as expectativas futuras, possibilitando ao setor privado o estabelecimento de objetivos claros de longo prazo. Os principais setores incluem geração e armazenamento de energia, refino, produtos químicos, siderúrgico, frete e transporte de longa distância e edifícios.
2. Estimular a demanda comercial por hidrogênio verde. Tecnologias limpas de hidrogênio estão disponíveis, mas os custos continuam desafiadores. Políticas que criem mercados sustentáveis para o hidrogênio verde, especialmente para reduzir as emissões do hidrogênio a partir de combustíveis fósseis, são necessárias para sustentar os investimentos de fornecedores, distribuidores e usuários. Ao ampliar as cadeias de suprimentos, esses investimentos podem gerar reduções de custo, seja de eletricidade com baixo carbono ou combustíveis fósseis com captura, utilização e armazenamento de carbono.
3. Apoiar os riscos de investimento dos iniciantes. Novas aplicações para hidrogênio, bem como projetos de geração e infraestrutura de hidrogênio, estão no ponto mais arriscado da curva de implantação. Empréstimos, garantias e outras ferramentas direcionadas e com prazo limitado, podem ajudar o setor privado a investir, aprender e compartilhar riscos e benefícios.
4. Apoiar ações de P&D. Além das reduções de custo das economias de escala, o P&D é crucial para melhorar o desempenho das tecnologias de hidrogênio, inclusive para pilhas a combustível, combustíveis à base de hidrogênio e eletrolisadores. As ações do governo, incluindo o uso de fundos públicos, são importantes para definir a orientação de áreas de pesquisa, diminuir riscos e atrair capital privado para a inovação.
5. Eliminar barreiras regulatórias e harmonizar padrões. Os desenvolvedores de projetos enfrentam obstáculos em que os regulamentos e os requisitos de permissão não são claros, impróprios para novos propósitos ou inconsistentes entre setores e países. Compartilhar o conhecimento e harmonizar os padrões é essencial, inclusive para equipamentos, segurança e certificação de emissões de diferentes fontes. As

complexas cadeias de geração de hidrogênio demandam que governos, empresas, comunidades e sociedade civil estabeleçam um diálogo regularmente. Com base nas políticas, infraestrutura e habilidades atuais, essas oportunidades de apoio mútuo podem ajudar a ampliar o desenvolvimento da infraestrutura, aumentar a confiança dos investidores e reduzir custos.

6. Envolver-se internacionalmente e acompanhar o progresso. É necessária uma cooperação internacional aprimorada em toda a cadeia, mas especialmente em padrões, compartilhamento de boas práticas e infraestrutura transfronteiriça. A produção e o uso de hidrogênio precisam ser monitorados e relatados regularmente para acompanhar o progresso em direção às metas de longo prazo.
7. Concentrar-se inicialmente nas oportunidades para o hidrogênio verde de maior viabilidade, escala ou ainda de menor custo, de modo a consolidar a cadeia produtiva. (IEA 2020).

Pelo exposto, percebe-se que as recomendações realizadas aos governos tanto pela IEA quanto pelo *Hydrogen Council* são, em maior ou menor detalhe, de grande similaridade, ratificando a plausibilidade das ações e políticas recomendadas. Para finalizar o presente capítulo, algumas recomendações adicionais específicas para o Brasil serão apresentadas, considerando a vasta reunião de informações e opiniões reunidas neste estudo.

Nesse sentido, recomenda-se a consolidação de uma estratégia nacional e de um plano de ação para continuação e aprimoramento das políticas públicas nos campos técnico, regulatório e tecnológico, possibilitando dessa forma o fortalecimento da cadeia produtiva de hidrogênio no Brasil.

O número de países com políticas que apoiam diretamente o investimento em tecnologias de hidrogênio vem crescendo continuamente. Conforme informado no Capítulo 2, mais de 20 países já possuem sua estratégia de hidrogênio e os investimentos anunciados já superaram os USD 70 bilhões.

Recomenda-se que o Brasil busque de forma célere um posicionamento estratégico no mercado global de fornecimento de hidrogênio verde, concretizar os primeiros contratos de exportação de hidrogênio verde para nações com capacidade de produção insuficiente para atendimento da demanda interna.

Conforme mencionado no Item 3.1, a produção de hidrogênio verde ainda é inexpressiva no Brasil e apenas cerca 5% da produção total possui fins comerciais. No entanto, projeta-se no curto e médio prazo o aumento na demanda pela substituição de insumos industriais e fontes

de energia de origem fóssil por renováveis, incluindo o hidrogênio verde e os produtos PtX. O Brasil apresenta grande diversidade de fontes renováveis e alternativas de energia, com elevada distribuição das mesmas pelo país. Dessa forma, do ponto de vista de disponibilidade de fontes para a produção de hidrogênio verde, o país apresenta condições favoráveis para atender a demanda crescente tanto no mercado interno como no externo. No entanto, recomenda-se o aprimoramento das condições de infraestrutura de produção e distribuição logística do hidrogênio, tanto em âmbito nacional como para escoamento para outros países.

Além disso, são listadas a seguir as principais recomendações em termos de medidas para o desenvolvimento de uma economia de hidrogênio sustentável no Brasil:

- Avaliação do potencial de desenvolvimento econômico e geração de empregos a partir do desenvolvimento de uma economia de hidrogênio voltada tanto para o atendimento da demanda nacional quanto internacional;
- Para o mercado internacional, desenvolvimento de um plano de ação concreto para fornecimento de hidrogênio produzido a partir de fontes alternativas de energia. Conforme estratégias nacionais e comprometimento crescente com as metas de descarbonização, os países consumidores do hidrogênio não realizarão aquisições de hidrogênio produzido a partir de fontes fósseis. O hidrogênio azul com CCS será aceito apenas durante transitório estimado em cerca de dez anos, até atingimento da competitividade de custos do hidrogênio verde;
- Realização de estudos técnicos detalhados sobre a capacidade de geração de hidrogênio verde atual, a partir do excedente de geração das energias renováveis, assim como do potencial estimado para futuras instalações;
- Realização de estudos técnicos sobre o potencial de utilização do hidrogênio verde em sistemas híbridos, fornecendo uma energia mais limpa e estável para sistemas isolados;
- Realização de estudos técnicos para a revitalização da indústria de fertilizantes nacional de forma sustentável a partir da utilização da amônia verde, reduzindo a exposição de setor agrícola a choques cambiais e de demanda externos;
- Realização de estudos técnicos para o mapeamento de potenciais *clusters* de hidrogênio no país, os quais por definição devem unir os elos de produção, distribuição e consumo, promovendo o acoplamento de setores. Nesse sentido, especialistas mencionam o trecho Rio de Janeiro – São Paulo como uma “rota de hidrogênio” em potencial por concentrar em seu entorno todos os elos da cadeia produtiva, no entanto até a elaboração do presente estudo não foi encontrada literatura acadêmica a respeito;
- Realização de estudos técnicos para avaliação dos potenciais de aplicação específica do hidrogênio verde nos setores de difícil descarbonização e/ou eletrificação, tais como o de transporte e segmentos da indústria;
- Inserção do hidrogênio verde na pauta da abertura do mercado de gás natural, de forma a avaliar o potencial para a mistura do hidrogênio ao gás natural, promovendo ganhos de escala na produção e distribuição do hidrogênio verde no mercado consumidor interno;
- Incremento das políticas de financiamento de projetos de P, D&I bem como realização de parcerias público-privadas para incentivar projetos de demonstração e comerciais nas tecnologias de hidrogênio para os setores industrial, transportes e energético;
- Investimento contínuo na qualificação de mão de obra nacional voltada para os temas de energias alternativas, descarbonização e tecnologias de hidrogênio e PtX;
- Continuação (IPHE, IEA, Parceria Energética Brasil-Alemanha) e celebração de novas cooperações internacionais para confirmar o comprometimento do país na descarbonização de sua economia e garantir um posicionamento estratégico diante do novo potencial econômico que as tecnologias de hidrogênio oferecem.

Conforme afirmado pela EPE (2021, p. 19), o desenvolvimento de tecnologias para a economia do hidrogênio irá “possibilitar uma participação importante no mercado mundial de equipamentos e serviços relacionados às energias renováveis e ao hidrogênio. Dessa forma, o engajamento do país na corrida para a implantação da economia do hidrogênio é altamente estratégico dos pontos de vista econômico, tecnológico e ambiental”.

6. Conclusão

Este estudo foi desenvolvido com o objetivo de realizar um mapeamento da indústria e dos principais atores acadêmicos e institucionais como uma preparação de um *roadmap* brasileiro de hidrogênio verde. Além disso, foi apresentada uma visão geral sobre as principais tecnologias de aplicação de hidrogênio verde e PtX e o seu estado de maturidade no Brasil em comparação aos países líderes nessas tecnologias.

Nesse sentido, foram reunidas informações relevantes sobre esse tema no Brasil em resposta às principais perguntas que motivaram a elaboração do trabalho, como **1)** a identificação dos principais produtores e consumidores e respectivos volumes de hidrogênio, **2)** principais tecnologias empregadas, **3)** principais stakeholders, **4)** posicionamento da indústria a respeito da introdução de hidrogênio verde na matriz energética e **5)** setores e áreas em que o hidrogênio verde deve ser aproveitado como insumo energético.

Da mesma forma que em outras localidades do globo, o mercado atual de hidrogênio no Brasil é composto majoritariamente por hidrogênio cinza para utilização como síntese de produtos e insumos industriais. A autoproductora Petrobras responde por cerca de 95% da produção nacional e apenas os 5% remanescentes, equivalente a cerca de 215 mil Nm³ anuais, são comercializados pela indústria de gases técnicos para os processos produtivos dos setores siderúrgico, metalúrgico, alimentos, vidros planos e geração de energia via termelétricas.

Mundialmente, o Brasil possui uma das matrizes energéticas mais limpas e figura entre as 15 maiores economias. Juntamente de mais de 150 países, o país também se comprometeu com metas internas para exercer sua contribuição na contenção da temperatura global em 1,5 °C, por meio de uma redução de 37% na emissão de GEE até 2025 e 43% até 2030, além de aumentar a participação de bioenergia sustentável para 18% e um aumento da participação de energias renováveis na matriz energética para 45% até 2030. Nesse sentido, o estudo procurou avaliar os potenciais para o desenvolvimento econômico sustentável a partir da utilização das tecnologias de hidrogênio verde para a descarbonização de setores da economia nacional.

Em relação ao desenvolvimento de um mercado consumidor interno para o hidrogênio verde, produzido a partir de fontes renováveis, as tecnologias PtX promovem o acoplamento de setores, atenuando os impactos da intermitência da renováveis e garantindo maior segurança energética ao país. Além disso, acredita-se em um aumento

da demanda nacional por hidrogênio verde nos próximos anos por parte de diversos setores da economia e atividades industriais, cujos atores da cadeia produtiva buscam a substituição de seus insumos e fontes de energia de origem fóssil por renovável, em resposta a uma tendência global de crescimento do comprometimento socioambiental (Agenda ESG, Objetivos de Desenvolvimento Sustentáveis, entre outros) por um lado e de aprimoramento dos mecanismos de taxaço de emissões de GGE por outro.

Já no mercado internacional de hidrogênio, mais de 20 nações possuem estratégias nacionais, *roadmaps* e planos de ação para as tecnologias de hidrogênio formalmente publicadas e estima-se que até 2025 todos os países, que somados representam 80% do PIB global, irão desenvolver suas estratégias. Os investimentos governamentais para o desenvolvimento de economias de hidrogênio já totalizam atualmente USD 70 bilhões.

Percebe-se uma “corrida” dos países para se posicionarem estrategicamente nas rotas de fornecimento global de hidrogênio verde, como é o caso de países com similaridades climáticas e geográficas com o Brasil, como o Chile e Austrália. A razão para isso reside no fato que diversos países não capazes de atender sua demanda interna por hidrogênio verde, havendo necessidade de importação do insumo. Partindo de um cenário de descarbonização massiva das economias, primeiras estimativas indicam que a Alemanha e a União Europeia precisarão importar, respectivamente, 20 TWh e 140 TWh em 2030 e 800 TWh e 2250 TWh em 2050 (FRAUNHOFER ISE, 2019).

De acordo com o *Hydrogen Council*, o mundo atualmente conta com 228 projetos anunciados em hidrogênio totalizando mais de USD 80 bilhões em investimentos confirmados até 2030 e USD 300 bilhões anunciados. Tais projetos variam em porte e finalidade, sendo, no entanto, voltados principalmente para aplicação industrial em larga escala, transportes, infraestrutura, armazenamento bem como acoplamento de setores com uma economia integrada em hidrogênio verde.

O Brasil possui notável variedade e distribuição de fontes renováveis de energia, das quais se destacam as fontes eólica, solar fotovoltaica, hídrica e biomassa. Sob essa ótica, avaliando a capacidade instalada atual bem como projeções de crescimento até 2029 dessas fontes, pode-se concluir o Brasil oferece condições altamente favoráveis para a produção de hidrogênio verde.

Nesse sentido, um dos principais entregáveis do presente estudo foi a realização de um mapeamento dos principais atores atuais e em potencial do mercado de hidrogênio no Brasil, bem como de uma pesquisa de opinião da indústria sobre a entrada e o potencial de hidrogênio verde no país. Apreende-se a partir do mapeamento realizado que já existem atualmente atores nacionais e internacionais em todos os elos da cadeia produtiva de hidrogênio no país, seja no ramo da produção, fornecimento de tecnologia, componentes e serviços agregados ou ainda no consumo. Com o crescimento da demanda global por hidrogênio verde, juntamente do desenvolvimento de políticas públicas adequadas, a cadeia de produção brasileira poderá se desenvolver e especializar continuamente nas rotas tecnológicas de hidrogênio e PtX. Estima-se que cerca de 90% das empresas participantes no *Hydrogen Council* possuem subsidiárias no Brasil, indicando para o potencial de cooperações entre empresas nacionais e estrangeiras instaladas no país, com foco aprimoramento uma cadeia de fornecimento nacional.

Já em relação à pesquisa de opinião conduzida, foi obtido um total 116 respostas válidas de empresas e instituições atuantes de forma direta ou indireta na cadeia de produção de hidrogênio brasileira. Além da receptividade na participação da pesquisa, destaca-se a disposição das empresas participantes a investir no tema de hidrogênio verde. Dentre os respondentes, 75% acreditam que o hidrogênio verde será comercialmente competitivo em até 10 anos e 55% estão avaliando ou já optaram por utilizar hidrogênio verde em suas empresas. No entanto, na percepção de 76% dos respondentes o Brasil está “muito atrasado” ou “atrasado” quando comparado à atuação de outros países no mercado internacional de hidrogênio.

Dentre as principais recomendações realizadas para diminuir essa percepção de atraso do país para essa nova oportunidade de desenvolvimento econômico sustentável e geração de empregos que se desponta, destaca-se a necessidade de consolidação de uma estratégia nacional brasileira para o hidrogênio, contendo um plano de ação concreto para fomentar o desenvolvimento de um mercado nacional e internacional de hidrogênio. O aprofundamento do arcabouço técnico, regulatório e tecnológico são imprescindíveis para a criação de um ambiente de negócios favorável.

Da mesma forma, a continuidade e o incremento nos investimentos públicos em projetos de P&D e demonstração e na qualificação de mão de obra técnica especializada, além da realização de parcerias público-privadas, são essenciais para acelerar os ganhos de escala e redução dos custos de produção e distribuição do gás. Por fim, recomenda-se também um posicionamento tempestivo do governo brasileiro no mercado global de fornecimento de hidrogênio verde, no qual movimentos para garantir uma parcela de participação e respectivos retornos econômicos já estão sendo realizados de forma antecipada por algumas nações.

O desenvolvimento de uma economia de hidrogênio sustentável pode trazer inúmeros benefícios para o Brasil, dentre os quais a prosperidade econômica com geração de uma vasta quantidade de empregos diretos e indiretos e a preservação do meio ambiente, contribuindo, desse modo, para o fortalecimento de uma imagem internacional positiva do Brasil com atração de investimentos e promoção de parcerias internacionais.

Pelo presente estudo conclui-se que o Brasil possui as condições iniciais básicas para fomentar o desenvolvimento de um mercado interno de hidrogênio sustentável, bem como de assumir um papel relevante no novo mercado global de cooperações para o fornecimento de hidrogênio verde que está se consolidando nesse momento. Diversos desafios de cunho técnico, regulatório, tecnológico e de infraestrutura deverão ser solucionados de forma coordenada por todas as partes interessadas (incluindo governo, setor privado e academia) durante essa longa jornada, com a confiança de que os benefícios para os brasileiros compensarão todo o esforço ao final.

7. Final considerations

This study was developed with the goal of mapping the industry and the main academic and institutional actors as a preparation for a Brazilian green hydrogen roadmap. In addition, an overview was presented about the main green hydrogen and PtX application technologies and their state of maturity in Brazil in comparison with the leading countries in these technologies.

In this sense, relevant information about this topic in Brazil was gathered in response to the main questions that motivated the preparation of the work, such as **1)** the identification of the main producers and consumers and their respective hydrogen volumes, **2)** main technologies employed, **3)** main stakeholders, **4)** industry's position regarding the introduction of green hydrogen in the energy matrix, and **5)** sectors and areas where green hydrogen should be used as an energy carrier.

Similarly to other places in the world, the current hydrogen market in Brazil is mostly comprised of gray hydrogen for use in the synthesis of products and industrial feedstock. The self-producer Petrobras is responsible for about 95% of the national production and only the remaining 5%, equivalent to about 215,000 Nm³ annually, is sold by the technical gas industry for the production processes of the steel, metallurgical, food, flat glass and thermal power generation sectors.

Worldwide, Brazil has one of the cleanest energy matrixes and is among the 15 largest economies. Along with more than 150 countries, the country has also committed itself to internal goals to contribute to containing global temperature by 1.5 °C, through a 37% reduction in GHG emissions by 2025 and 43% by 2030, in addition to increasing the share of sustainable bioenergy to 18% and an increase in the share of renewable energy in the energy matrix to 45% by 2030. In this sense, the study sought to evaluate the potential for sustainable economic development from the use of green hydrogen technologies for the decarbonization of sectors of the national economy.

Regarding the development of a domestic consumer market for green hydrogen, produced from renewable sources, it should be noted that PtX technologies promote sector coupling, mitigating the impacts of intermittent renewables and ensuring greater energy security for the country. Besides, it is believed that there will be an increase in the national demand for green hydrogen in the next few years by diverse sectors of the economy and industrial activities, whose stakeholders in the production chain seek to replace their feedstocks and energy sources of fossil origin for renewable ones, in response to a global trend of

socio-environmental commitment (ESG Agenda, Sustainable Development Goals, among others) on the one hand, and the improvement of GGE emission taxation mechanisms on the other.

In the international hydrogen market, more than 20 nations have already launched national strategies, roadmaps, and action plans for hydrogen technologies and it is estimated that by 2025 all countries that together represent 80% of global GDP will develop their strategies. Government investments for the development of hydrogen economies sums up already \$70 billion USD.

It is noticeable a "race" of countries to strategically position themselves in the global green hydrogen supply routes, as is the case of countries with climatic and geographical similarities with Brazil, such as Chile and Australia. The reason for this lies in the fact that several countries are not able to meet their domestic demand for green hydrogen, with the need to import the input. Assuming a scenario of massive decarbonization of the economies, first estimates indicate that Germany and the European Union will need to import respectively 20 TWh and 140 TWh in 2030 and 800 TWh and 2250 TWh in 2050 (FRAUNHOFER ISE, 2019).

According to the Hydrogen Council, the world currently has 228 announced hydrogen projects totaling more than US\$ 80 billion in confirmed investments until 2030 and US\$ 300 billion announced. These projects vary in size and purpose, but are mainly aimed at large scale industrial application, transportation, infrastructure, storage as well as sector coupling with an integrated green hydrogen economy.

Brazil has a remarkable variety and distribution of renewable energy sources, from which wind, solar photovoltaic, hydro and biomass sources can be highlighted. From this perspective, evaluating the current installed capacity as well as growth projections until 2029 of such sources, one can conclude that Brazil offers highly favorable conditions for the production of green hydrogen.

In this sense, one of the principal deliverables of the present study was the mapping of the main current and potential stakeholders of the hydrogen market in Brazil, as

well as an opinion poll of the industry about the entrance opportunities and potential of green hydrogen in the country. From the mapping carried out it can be inferred that there are currently national and international players in all links of the hydrogen production chain in the country, whether in production, technology supply, components and aggregated services or even in consumption. Starting from the growth of the global demand for green hydrogen, together with the development of adequate public policies, the Brazilian production chain will be able to develop and specialize continuously in the technological routes for hydrogen and PtX. In this sense, it is estimated that about 90% of the companies participating in the Hydrogen Council have subsidiaries in Brazil, indicating the potential for cooperation between domestic and foreign companies installed in the country, with a focus on improving the national supply chain.

Regarding the opinion poll conducted, a total of 116 valid answers were obtained from companies and institutions acting directly or indirectly in the Brazilian hydrogen production chain. Besides the receptivity in participating in the research, the willingness of the companies to invest in the green hydrogen theme stands out. Among the respondents, 75% believe that green hydrogen will be commercially competitive within 10 years and 55% are evaluating or have already chosen to use green hydrogen in their companies. However, in the perception of 76% of the respondents Brazil is "very behind" or "behind" when compared to the performance of other countries in the international hydrogen market.

Among the main recommendations made to reduce this perception of the country as lagging behind for this new opportunity of sustainable economic development and job creation that is emerging, it is worth mentioning the need to consolidate a Brazilian national strategy for hydrogen,

containing a concrete action plan to promote the development of a national and international hydrogen market. In this sense, the deepening of the technical, regulatory and technological framework is essential to create a favorable business environment.

Likewise, the continuity and increase of public investments in R&D and demonstration projects and in the qualification of specialized technical workforce, besides public-private partnerships, are essential to accelerate the gains of scale and reduce the costs of the green gas production and distribution. Finally, it is also recommended a prompt positioning of the Brazilian government in the global green hydrogen supply market, in which movements to guarantee a share of participation and respective economic returns are already being made in an advance by some nations.

The development of a sustainable hydrogen economy can bring innumerable benefits to Brazil, mainly economic prosperity with generation of a vast quantity of direct and indirect jobs and the preservation of the environment, thus contributing to strengthen a positive international image of Brazil, attracting investments and promoting international partnerships.

The present study concludes that Brazil has the basic initial conditions to promote the development of an internal sustainable hydrogen market, as well as to assume a relevant role in the new global cooperation market for green hydrogen supply that is being consolidated at this moment. Several technical, regulatory, technological and infrastructure challenges will have to be solved in a coordinated way by all stakeholders (including government, private sector and academy) during this long journey, with the confidence that the benefits for Brazilians will be worth the effort.

Referências

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – Aneel. **Chamada nº 021/2016**. Projeto Estratégico “Arranjos Técnicos e Comerciais Para a Inserção de Sistemas de Armazenamento de Energia no Setor Elétrico Brasileiro” Agencia Nacional de Energia Elétrica. Brasília –DF. 2016.

_____. **Chamada No 022/2018**. Projeto Estratégico: “Desenvolvimento de Soluções em Mobilidade Elétrica Eficiente” Agencia Nacional de Energia Elétrica. Brasília –DF. 2019.

_____. **Resolução Normativa Nº 493, DE 5 DE JUNHO DE 2012**. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012493.pdf>. Acesso em 05 de março de 2021.

_____. **Siga- Sistema de Informações de Geração da Aneel**. 2020. Disponível em: <https://bit.ly/2IGf4Q0>. Acesso em 23 de novembro de 2020.

Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – ANP. **Anuário Estatístico 2020**. Seção 2 - Indústria Nacional do Petróleo e Gás Natural. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/anuario-estatistico/anuario-estatistico-2020>. Acesso em 08 de março de 2021.

AMBIENTE BRASIL. **Gaseificação Industrial**. 2020. Disponível em: https://ambientes.ambientebrasil.com.br/energia/biomassa/gaseificacao_industrial.html. Acesso em 23 de novembro de 2020.

ARCELOR MITTAL. **Hydrogen-based steelmaking to begin in Hamburg**. Disponível em: <https://corporate.arcelormittal.com/media/case-studies/hydrogen-based-steelmaking-to-begin-in-hamburg>. Acesso em 24 de julho de 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA – ABEEÓLICA. **Boletim Anual de Geração Eólica 2019**. Disponível em: http://abeeolica.org.br/wp-content/uploads/2020/06/PT_Boletim-Anual-de-Gera%C3%A7%C3%A3o-2019.pdf. Acesso em 23 de novembro de 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA (ABSOLAR). **Panorama da solar fotovoltaica no Brasil e no mundo**. Disponível em: <https://www.absolar.org.br/mercado/infografico/>. Acesso em 05 de março de 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **IEC/TS 62282-1**. Rio de Janeiro. 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PEQUENAS CENTRAIS HIDRELÉTRICAS E CENTRAIS GERADORAS HIDRELÉTRICAS (ABRAPCH). Disponível em: <https://abrapch.org.br/>. Acesso em 15 de janeiro de 2021.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL PARA DIFUSÃO DE ADUBOS. **Principais indicadores do setor de fertilizantes. 2020**. Disponível em: http://anda.org.br/wp-content/uploads/2021/02/Principais_Indicadores_2020_.pdf. Acesso em 26 de fevereiro de 2021.

AUSTRALIAN GOVERNMENT: Department of Industry, Science, Energy and Resources. **Technology Investment Roadmap**. 2020a. Disponível em: <https://www.industry.gov.au/sites/default/files/September%202020/document/first-low-emissions-technology-statement-2020.pdf>. Acesso em 23 de novembro de 2020.

_____. **Resources and Energy Quarterly**. 2020b. Disponível em: https://publications.industry.gov.au/publications/resources_andenergyquarterlydecember2020/index.html#:~:text=Australia's%20thermal%20coal%20exports%20are,by%20higher%20prices%20and%20volumes. Acesso em 23 de novembro de 2020.

BAILEY, Mary Page. **MITSUI INVESTS \$25 MILLION IN CALIFORNIA-BASED HYDROGEN STARTUP**. Chemical Engineering. 2020. Disponível em: <https://www.chemengonline.com/mitsui-invests-25-million-in-california-based-hydrogen-startup/?printmode=1>. Acesso em 23 de novembro de 2020.

BIOMASSA BRASIL **Resíduos Agroflorestais e Agroindustriais para produção de Briquetes e Péletes**. Disponível em: <http://www.biomassabr.com/bio/resultadonoticias.asp?id=2392>. Acesso em 23 de novembro de 2020.

BRASIL. **Intended nationally determined contribution towards achieving the objective of the united nations framework convention on climate change**. 2016. Disponível em: <https://www4.unfccc.int/sites/submissions/INDC/Published%20Documents/Brazil/1/BRAZIL%20iNDC%20english%20FINAL.pdf>. Acesso em 12 de janeiro de 2021.

BROWN, Trevor. **The fertilizer industry is learning to love green ammonia.** Ammonia Energy Association. 2019. Disponível em <https://www.ammoniaenergy.org/articles/the-fertilizer-industry-is-learning-to-love-green-ammonia/>. Acesso em 23 de novembro de 2020.

BURGESS, M. H2 View. **French Government releases €100bn recovery plan through which hydrogen will play a key role.** 2020. Disponível em: <https://www.h2-view.com/story/french-government-releases-e100bn-recovery-plan-through-which-hydrogen-will-play-a-key-role/>. Acesso em 23 de novembro de 2020.

BURGESS, M. **World first: Hydrogen for glass production.** H2 View 2020. Disponível em <https://www.h2-view.com/story/world-first-hydrogen-for-glass-production/>. Acesso em 23 de novembro de 2020.

BUZATO, V. H. **Aneel define preço máximo da energia solar em leilão.** Sun Volt. 2019. Disponível em <http://www.sunvoltenergiasolar.com.br/aneel-define-preco-maximo-de-us-51-mwh-e-muda-regras-da-energia-solar-em-leilao-a-6>. Acesso em 23 de novembro de 2020

BW EXPO 2020. **Trampolim para economia mundial do hidrogênio.** 2020. Disponível em: <https://www.bwexpo.com.br/trampolim-para-economia-mundial-do-hidrogenio/>. Acesso em 23 de novembro de 2020.

_____. **Compromisso da Europa com Hidrogenio Verde.** BW expo Summit Digital 2020 Disponível em: <https://www.bwexpo.com.br/compromisso-da-europa-com-o-hidrogenio-verde/>. Acesso em 23 de novembro de 2020.

CALIFORNIA FUEL CELL PARTNERSHIP (CAFCP). **U.S. Hydrogen Road Map Released.** 2019. Disponível em: <https://cafc.org/blog/us-hydrogen-road-map-released>. Acesso em 23 de novembro de 2020.

CÂMARA DE COMERCIO E INDÚSTRIA BRASIL ALEMANHA (AHK Rio de Janeiro). **Hidrogênio Verde - Oportunidades de Negócios.** 2020. Disponível em: <https://brasilien.rio.ahk.de/pt/meio-ambiente/hidrogenio-verde-oportunidades-de-negocios>. Acesso em 23 de novembro de 2020.

CANAL ENERGIA. **Enel Green Power projeta planta-piloto de hidrogênio verde no Chile.** 2020. Disponível em: <https://www.canalenergia.com.br/noticias/53150149/enel-green-power-projeta-planta-piloto-de-hidrogenio-verde-no-chile>. Acesso em 23 de novembro de 2020.

_____. **Furnas começa produção de hidrogênio na UHE Itumbiara.** Disponível em: <https://www.canalenergia.com.br/noticias/53166122/furnas-comeca-producao-de-hidrogenio-na-uhe-itumbiara>. Acesso em 11 de março de 2021.

_____. **Energia eólica atinge 15 GW em capacidade instalada no Brasil.** 2019. Disponível em: <https://canalenergia.com.br/noticias/53096013/energia-eolica-atinge-15-gw-em-capacidade-instalada-no-brasil>. Acesso em 23 de novembro de 2020.

CASEY, J. P. **Hydrogen-powered vehicles: innovations in the future of mining machinery?** Mining Technology. 2020. Disponível em: <https://www.mining-technology.com/features/hydrogen-powered-vehicles-inde-novembro-deations-in-the-future-of-mining-machinery>. Acesso em 23 de novembro de 2020.

CASTRO, Nivalde; CHAVES; Ana e DORES, Adely. **O Brasil na Transição Energética para o Hidrogênio Verde.** Valor Econômico, Rio de Janeiro, 2021. Disponível em: <https://valor.globo.com/opiniaocolumna/o-brasil-na-transicao-energetica-para-o-hidrogenioverde.ghtml>. Acesso em 21 de janeiro de 2021.

CEMBUREAU – The European Cement Association. **Cementing the European Green Deal: Reaching climate neutrality along the cement and concrete value chain by 2050.** Disponível em: <https://cembureau.eu/media/kuxd32gi/cembureau-2050-roadmap-final-version-web.pdf>. Acesso em 24 de fevereiro de 2021.

CENÁRIOS EÓLICA: **Atlas Eólicos.** Brasil Energia. 2021. Disponível em: <https://cenarioeolica.editorabrasilenergia.com.br/panorama/atlas-2/>. Acesso em 08 de abril de 2021.

CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS (CGEE). **Hidrogênio energético no Brasil. Subsídios para políticas de competitividade: 2010-2025.** Brasília. 2010.

CEPSA. **Cepsa - Hydrotreated Vegetable Oil.** Cepsa Corporate, 2018. Disponível em: <https://pt-br.facebook.com/cepsa/videos/2044402543797854/>. Acesso em 23 de novembro de 2020.

CHOLTEEVA, Yoana. **Bigger is better: on board the world's largest electric mining vehicle.** Mining Technology, 2021. Disponível em: <https://www.mining-technology.com/features/bigger-is-better-on-board-the-worlds-largest-electric-mining-vehicle/>. Acesso em 12 de novembro de 2020.

CIBIOGAS. **BIOGASMAP.** Disponível em: <https://cibiogas.org/blog-post/mapa-do-biogas-no-brasil-conheca-as-atualizacoes-do-biogasmap/>. Acesso em 23 de novembro de 2020.

CLIMATE ACCOUNTABILITY INSTITUTE. **Update of Carbon Majors 1965-2018.** Press Release. 2020. Disponível em: <https://climateaccountability.org/pdf/CAI%20PressRelease%20Dec20.pdf>. Acesso em 21 de janeiro de 2021.

CLIMATE ACTION TRACKER. **Acompanhamento das ações climáticas dos países desde 2009**. Disponível em: <https://climateactiontracker.org/>. Acesso em 18 de janeiro de 2021.

COAG ENERGY COUNCIL HYDROGEN WORKING GROUP. **Australia's National Hydrogen Strategy**. Disponível em: <https://www.industry.gov.au/sites/default/files/2019-11/australias-national-hydrogen-strategy.pdf>. Acesso em 18 de janeiro de 2021.

COMISSÃO EUROPEIA. **Pacto Ecológico Europeu**. Disponível em: https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_pt. Acesso em 12 de outubro de 2020.

COMMONWEALTH SCIENTIFIC AND INDUSTRIAL RESEARCH ORGANISATION (CSIRO). **National Hydrogen Roadmap: Pathways to an economically sustainable hydrogen industry in Australia**. Disponível em: <https://www.csiro.au/en/Do-business/Futures/Reports/Energy-and-Resources/Hydrogen-Roadmap>. Acesso em 26 de fevereiro de 2021.

CONTACTO. **Hidrogênio verde. A "rock-star" da transição energética na Europa**. 2020. Disponível em: <https://www.wort.lu/pt/sociedade/hidrogenio-verde-a-rock-star-da-transicao-energetica-na-europa-5f06b017da2cc1784e3612ef>. Acesso em 23 de novembro de 2020.

CRELIER, Crtistiane. **Após dois anos de alta, produção industrial fecha 2019 com queda de 1,1%**. Agência IBGE Notícias. Editoria Estatísticas Econômicas. Rio de Janeiro. 2020. Disponível em: <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-noticias/2012-agencia-de-noticias/noticias/26778-apos-dois-anos-de-alta-producao-industrial-fecha-2019-com-queda-de-1-1>. Acesso em 04 de janeiro de 2021.

CSIRO AUST. **Mining and manufacturing**. Disponível em: <https://www.csiro.au/en/Research/Mining-manufacturing>. Acesso em 23 de novembro de 2020.

CSIRO Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation. **National Hydrogen Roadmap**. 2020. Disponível em: <https://www.csiro.au/en/Do-business/Futures/Reports/Energy-and-Resources/Hydrogen-Roadmap>. Acesso em 23 de novembro de 2020.

DELOITTE. **Fuelling the Future of Mobility – Hydrogen and fuel cell solutions for transportation**, Vol. 1. 2020. Disponível em: <https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/cn/Documents/finance/deloitte-cn-fueling-the-future-of-mobility-en-200101.pdf>. Acesso em 24 de fevereiro de 2021.

DEUTSCHE ENERGIE-AGENTUR (DENA). **Strategieplattform Power to Gas**. Disponível em: <https://www.powertogas.info/>. Acesso em 24 de fevereiro de 2021.

_____. **Woher kommt der Wasserstoff in Deutschland bis 2050?** Disponível em: https://www.dena.de/fileadmin/dena/Dokumente/Pdf/9060_MOB_Studie_Woher_kommt_der_Wasserstoff_in_Deutschland_bis_2050_Abschlussbericht.pdf. Acesso em 02 de março de 2021.

DEUTSCHLAND. Bundesministerium für Bildung und Forschung. **Woher soll der Grüne Wasserstoff kommen?** Disponível em: <https://www.bmbf.de/de/woher-soll-der-gruene-wasserstoff-kommen-11766.html#:~:text=So%20geht%20das%20Max%20Planck,Tonnen%20Wasserstoff%20wird%20importieren%20m%C3%BCssen>. Acesso em 19 de janeiro de 2021.

DW. **Carbon-intensive cement industry feeling the heat**. Disponível em: <https://www.dw.com/en/carbon-intensive-cement-industry-feeling-the-heat/a-50546807>. Acesso em 21 de fevereiro de 2021.

EFI - ENERGY FUTURES INITIATIVE. **Optionality, Flexibility, & Innovation: Pathways For Deep Decarbonization In California**. 2019. Disponível em: https://static1.squarespace.com/static/58ec123cb3db2bd94e057628/t/5cd04bf2104c7b911cec485b/1557154802835/EFI_CA_Decarbonization_FactSheet.pdf Acesso em 12 de agosto de 2020.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (BRASIL). **Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2020 ano base 2019**. Rio de Janeiro. 2020. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-160/topico-168/Anu%C3%A1rio%20Estat%C3%ADstico%20de%20Energia%20El%C3%A9trica%202020.pdf>. Acesso em 12 de fevereiro de 2020.

_____. **Balanco Energético Nacional 2020: Ano base 2019. Rio de Janeiro. 2020a**. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2020>. Acesso em 05 de janeiro de 2020.

_____. **Informe Técnico Competitividade do Gás Natural: Estudo de Caso na Indústria de Fertilizantes Nitrogenados**. 2019. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/informe-tecnico-competitividade-do-gas-natural-estudo-de-caso-na-industria-de-fertilizantes-nitrogenados>. Acesso em 23 de novembro de 2020.

_____. **NOTA TÉCNICA PR 07/18. Premissas e Custos da Oferta de Energia Elétrica no horizonte de 2050.** Rio de Janeiro. 2018. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-227/topico-456/NT%20PR%20007-2018%20Premissas%20e%20Custos%20Oferta%20de%20Energia%20El%C3%A9trica.pdf>. Acesso em 26 de fevereiro de 2021.

_____. **Roadmap Eólica Offshore Brasil. Perspectivas e caminhos para a energia eólica marítima.** Rio de Janeiro. 2020b. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-456/Roadmap_Eolica_Offshore_EPE_versao_R2.pdf. Acesso em 01 de março de 2021.

ENEL GREEN POWER CHILE. **Enel Green Power, together with AME, announces plans for first pilot project for green hydrogen production in Chile.** 2020. Disponível em: <https://www.enel.com/media/explore/search-press-releases/press/2020/10/enel-green-power-together-with-ame-announces-plans-for-first-pilot-project-for-green-hydrogen-production-in-chile>. Acesso em 23 de novembro de 2020.

ENERDATA. **Global Energy Statistical Yearbook 2020. Share of renewables in electricity production.** 2020. Disponível em: <https://yearbook.enerdata.net/renewables/renewable-in-electricity-production-share.html>. Acesso em 23 de novembro de 2020.

ENGIE. **The GRHYD demonstration Project.** 2020. Disponível em: <https://www.engie.com/en/businesses/gas/hydrogen/power-to-gas/the-grhyd-demonstration-project>. Acesso em 23 de novembro de 2020.

EUROPEAN UNION. **A Hydrogen Strategy for a climate neutral Europe.** 2020. Disponível em: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/FS_20_1296. Acesso em 01 de março de 2021.

EUROSTAT. **Agri-environmental indicator - mineral fertiliser consumption.** European Commission. 2020. Disponível em: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Agri-environmental_indicator_-_mineral_fertiliser_consumption#:~:text=In%202018%2C%2010.2%20million%20tonnes,increase%20of%201.9%20%25%20since%202008.&text=In%202018%2C%201.1%20million%20tonnes,reduction%20of%201.2%20%25%20since%202008.&text=Therefore%2C%20it%20is%20important%20to,use%20of%20the%20mineral%20fertilisers. Acesso em 08 de abril de 2021.

FAKHRY, R; HARDING, R. **“Green” Hydrogen: Critical to Powering a Carbon-Free Future.** NRDC. 2020. Disponível em: <https://www.nrdc.org/experts/rachel-fakhry/green-hydrogen-critical-powering-carbon-free-future>. Acesso em 23 de novembro de 2020.

FARIAS, Pedro *et al.* **The Fertilizer Industry in Brazil and the Assurance of Inputs for Biofuels Production: Prospective Scenarios after COVID-19.** MDPI. 2020.

FONTES, Ruy. **Energias Solar e Eólica São as Formas de Geração Elétrica Mais Baratas Do Mundo.** Blog Blue Sol. 2018. Disponível em: <https://blog.bluesol.com.br/solar-e-eolica-mais-baratas/>. Acesso em 23 de novembro de 2020.

FORESIGHT Climate & Energy. **Hydrogen: The Northern Netherlands is ready.** 2019. Disponível em <https://foresightdk.com/hydrogen-northern-netherlands-is-ready/>. Acesso em 23 de novembro de 2020.

FRANCE HYDROGÈNE. **The Hydrogen sector’s proposals for the development of a renewable and low-carbon hydrogen industry in France.** Disponível em: https://1fa05528-d4e5-4e84-97c1-ab5587d4aabf.filesusr.com/ugd/45185a_243e896f130d4fb3b8e78e571afdca04.pdf. Acesso em 01 de fevereiro de 2021.

FRAUNHOFER INSTITUT FÜR SYSTEM- UND INNOVATIONSFORSCHUNG ISI. **Chancen und Herausforderungen beim Import von grünem Wasserstoff und Syntheseprodukten.** Policy Brief 03/2020. Karlsruhe. 2020. Disponível em: https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/cce/2020/policy_brief_wasserstoff.pdf. Acesso em 10 de janeiro de 2021.

_____. **Eine Wasserstoff-Roadmap für Deutschland.** Karlsruhe und Freiburg. 2019. Disponível em: https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/2019-10_Fraunhofer_Wasserstoff-Roadmap_fuer_Deutschland.pdf. Acesso em 10 de janeiro de 2021.

FRENCH INSTITUTE OF INTERNATIONAL RELATIONS (IFRI). **South Korea’s Hydrogen Strategy and Industrial Perspectives.** Edito Energie. 2020. Disponível em: <https://www.ifri.org/en/publications/editoriaux-de-lifri/edito-energie/south-koreas-hydrogen-strategy-and-industrial>. Acesso em 23 de novembro de 2020.

FUEL CELL & HYDROGEN ENERGY ASSOCIATION FCHEA. **Road Map to a US Hydrogen Economy.** 2020. Disponível em: <http://www.fchea.org/us-hydrogen-study>. Acesso em 23 de novembro de 2020.

FUEL CELLS WORKS. **South Korea to create three Hydrogen Cities by 2022.** Disponível em: <https://fuelcellsworks.com/news/south-korea-to-create-three-hydrogen-cities-by-2022/>. Acesso em 23 de novembro de 2020.

FUEL CELLS WORKS. **Daesan Hydrogen Cell Power Plant Completed with Help of Doosan Fuel Cells.** 2020. Disponível em: <https://fuelcellsworks.com/news/daesan-hydrogen-fuel-cell-power-plant-completed-with-help-of-doosan-fuel-cells/>. Acesso em 07 de fevereiro de 2021.

FURNAS. **Edital P&D 2020.** Chamada Pública para Apresentação de Propostas para Desenvolvimento de Projetos de P&D (p. 1 – 4). Disponível em: <https://fade.org.br/wp-content/uploads/2019/10/Anexo-I-Detalhamento-das-Demandas.pdf>. Acesso em 07 de janeiro de 2021.

_____. **UHE Itumbiara vai ganhar geração solar fotovoltaica.** Disponível em: <https://www.furnas.com.br/subsecao/310>. Acesso em 07 de janeiro de 2021.

GAUTO, Marcelo. **O refino do futuro.** EPBR. 2020. Disponível em: <https://epbr.com.br/o-refino-do-futuro/>. Acesso em 10 de janeiro de 2021.

GERMANY - FEDERAL MINISTRY FOR ECONOMIC AFFAIRS AND ENERGY. **Haru Oni PtX Project: Minister Altmaier hands over first approval notice for international green hydrogen project.** 2020. Disponível em: <https://www.bmwi.de/Redaktion/EN/Pressemitteilungen/2020/12/20201202-haru-oni-ptx-project-minister-altmaier-hands-over-first-approval-notice-for-international-green-hydrogen-project.html>. Acesso em 01 de fevereiro de 2021.

GLASS ALLIANCE EUROPE. **The European glass sector contribution to a climate neutral economy – Position paper.** 2019. Disponível em: https://www.glassallianceeurope.eu/images/para/gae-position-paper-on-decarbonisation-june-2019_file.pdf. Acesso em 24 de fevereiro de 2021.

GLOBAL CEMENT. **Green hydrogen for grey cement.** Disponível em: <https://www.globalcement.com/news/item/11061-green-hydrogen-for-grey-cement>. Acesso em 23 de novembro de 2020.

GOBIERNO DE CHILE – Ministerio de Energía. **Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde.** Disponível em: https://energia.gob.cl/sites/default/files/estrategia_nacional_de_hidrogeno_verde_-_chile.pdf. Acesso em 10 de janeiro de 2021.

GOVERNEMENT FRANÇAIS. **Stratégie nationale pour le développement de l'hydrogène décarboné en France.** Disponível em: https://1fa05528-d4e5-4e84-97c1-ab5587d4aabf.filesusr.com/ugd/45185a_eb89c38fe1b1418db4b36ee110ac8e32.pdf. Acesso em 10 de janeiro de 2021.

GOVERNMENT OF THE NETHERLANDS. **Government Strategy on Hydrogen.** Disponível em: https://1fa05528-d4e5-4e84-97c1-ab5587d4aabf.filesusr.com/ugd/45185a_f22f45f329cf4841b7604f0c4e6d9c0b.pdf. Acesso em 21 de janeiro de 2021.

H2 GLOBAL. **Die Globale Energiewende gestalten.** Disponível em: <https://h2-global.de/>. Acesso em 15 de março de 2021.

H2 VIEW. **Mining giants form Green Hydrogen Consortium.** 2020. Disponível em: <https://www.h2-view.com/story/mining-giants-form-green-hydrogen-consortium/>. Acesso em 02 de outubro de 2020.

HANSON. Heidelberg Cement Group. **Leading the way in fuel-switching research project.** 2020. Disponível em: <https://www.hanson.co.uk/en/about-us/news-and-events/fuel-switching-research-project>. Acesso em 11 de outubro de 2020.

HOC HYDROGEN ONLINE CONFERENCE. **Apresentação NEDO** Disponível em: <https://hydrogen-online-conference.com/>. Acesso em 23 de novembro de 2020.

HOLLAND INNOVATION NETWORK CHINA. **Overview of hydrogen and fuel cell developments in China.** Shanghai. 2019. Disponível em: <https://www.nederlandwereldwijd.nl/binaries/nederlandwereldwijd/documenten/publicaties/2019/03/01/waterstof-in-china/Holland+Innovation+Network+in+China+-+Hydrogen+developments.+January+2019.pdf>. Acesso em 07 de fevereiro de 2021.

HYDROGEN COUNCIL. **How hydrogen empowers the energy transition.** 2017. Disponível em: <https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2017/06/Hydrogen-Council-Vision-Document.pdf>. Acesso em 23 de novembro de 2020.

_____. **Hydrogen Insights: A perspective on hydrogen investment, market development and cost competitiveness.** 2021. Disponível em: <https://hydrogencouncil.com/en/hydrogen-insights-2021/>. Acesso em 01 de março de 2021.

_____. **Hydrogen, Scaling Up.** 2017. Disponível em: <https://hydrogencouncil.com/en/study-hydrogen-scaling-up/>. Acesso em 23 de novembro de 2020.

HYDROGEN MOBILITY EUROPE. **Emerging Conclusions 2020.** Disponível em: https://h2me.eu/wp-content/uploads/2021/01/H2ME_Emerging-Conclusions2020.pdf. Acesso em 24 de fevereiro de 2021.

HYLAW ONLINE DATABASE. **Connection of the E-grid to the electrolyser**. 2020. Disponível em <https://www.hylaw.eu/database/electricity-grid-issues-for-electrolysers/connection-of-the-e-grid-to-the-electrolyser>. Acesso em 23 de novembro de 2020.

IEEFA. **IHS Markit says green hydrogen will be cost competitive by 2030**. Disponível em: <https://ieefa.org/ihs-markit-says-green-hydrogen-will-be-cost-competitive-by-2030/>. Acesso em 12 de agosto de 2020.

INITIATIVE, MIT ENERGY. **Managing large-scale penetration of intermittent renewables**. 2012. Disponível em: <https://energy.mit.edu/wp-content/uploads/2012/03/MITEI-RP-2011-001.pdf>.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **Cement – Tracking Report**. 2020a. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/cement>. Acesso em 24 de fevereiro de 2021.

_____. **Global demand for pure hydrogen, 1975-2018**. Disponível em: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-demand-for-pure-hydrogen-1975-2018>. Acesso em 24 de fevereiro de 2021.

_____. (2020, b) **Iron and Steel Technology Roadmap – Technology Report**. 2020. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/iron-and-steel-technology-roadmap>. Acesso em 24 de fevereiro de 2021.

_____. **Tracking Transport 2020**. 2020c. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/tracking-transport-2020>. Acesso em 24 de fevereiro de 2021.

_____. **New Energy Vehicle (NEV) Mandate Policy**. 2019a. Disponível em: <https://www.iea.org/policies/3335-new-energy-vehicle-nev-mandate-policy>. Acesso em 12 de fevereiro de 2021.

_____. **The Future of Hydrogen. Seizing today's opportunities**. 2019b. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>. Acesso em 23 de novembro de 2020.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **PIB cresce 3,2% no 4º tri, mas fecha 2020 com queda de 4,1%, a maior em 25 anos**. Disponível em: <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-noticias/2012-agencia-de-noticias/noticias/30166-pib-cresce-3-2-no-4-tri-mas-fecha-2020-com-queda-de-4-1-a-maior-em-25-anos>. Acesso em 10 de março de 2021.

IPHE – International Partnership for Hydrogen and Fuel Cells in the Economy. Disponível em: <https://www.iphe.net/japan>. Acesso em 02 de março de 2021.

IRENA - INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY. **Green Hydrogen Cost Reduction: Scaling up Electrolysers to Meet the 1.5 °C Climate Goal**. Abu Dhabi. 2020. Disponível em: https://irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Dec/IRENA_Green_hydrogen_cost_2020.pdf. Acesso em 17 de janeiro de 2021.

_____. **Hydrogen from renewable power: Technology outlook for the energy transition**. Abu Dhabi. 2018. Disponível em: <https://www.irena.org/publications/2018/Sep/Hydrogen-from-renewable-power>. Acesso em 11 de novembro de 2020.

ITAIPU BINACIONAL. **Com o apoio da Itaipu, Paraná ganha a 1ª planta de hidrogênio**. <https://www.itaipu.gov.br/sala-de-imprensa/noticia/com-o-apoio-da-itaipu-parana-ganha-1%C2%AA-planta-de-hidrogenio>. Acesso em 07 de fevereiro de 2021.

JASON, Deign. **10 Countries Moving Toward a Green Hydrogen Economy**. GTM Green Tech Media. 2019. Disponível em: <https://www.greentechmedia.com/articles/read/10-countries-moving-towards-a-green-hydrogen-economy>. Acesso em 23 de novembro 2020.

KAN, Sichao. **South Korea's Hydrogen Strategy and Industrial Perspectives**. Édito Énergie, Ifri, 2018. Disponível em: https://www.ifri.org/sites/default/files/atoms/files/sichao_kan_hydrogen_korea_2020_1.pdf. Acesso em 10 de outubro de 2021.

KATSUHIRO, Hirrose. **“Path to Hydrogen Competitiveness – A Cost Perspective”**. BW expo Summit Digital 2020. 2020. Disponível em: <https://www.bwdigital.org.br/>. Acesso em 23 de novembro de 2020.

KHIMOD, ALCEN. **Pilots**. 2020. Disponível em: <https://www.khimod-alcen.com/pilots>. Acesso em 23 de novembro de 2020.

KNIGHT, H. **Single-step process produces hydrogen and carbon monoxide for synthetic green fuels**. The Engineer. 2019. Disponível em: <https://www.theengineer.co.uk/single-step-process/>. Acesso em 23 de novembro de 2020.

KRIS De Decker. **How (Not) to Run a Modern Society on Solar and Wind Power Alone**. Low Tech Magazine. 2020. Disponível em: <https://www.lowtechmagazine.com/2017/09/how-to-run-modern-society-on-solar-and-wind-powe.html>. Acesso em 23 de novembro de 2020.

LSE – London School of Economics. **What is a carbon price and why do we need one?** London. 2018. Disponível em: <https://www.lse.ac.uk/granthaminstitute/explainers/what-is-a-carbon-price-and-why-do-we-need-one/#:~:text=A%20carbon%20price%20is%20a,countries%20to%20reduce%20their%20emissions>. Acesso em 12 de agosto de 2020.

MAGOUIN, Ines. **MOROCCO: Partnership with Germany for green hydrogen.** Afrik 21. 2020. Disponível em: <https://www.afrik21.africa/en/morocco-partnership-with-germany-for-green-hydrogen/>. Acesso em 23 de novembro 2020.

MENDES, ANDRE *et al.* **Mercado de Refino de Petróleo no Brasil.** BNDES. Rio de Janeiro, v. 24, n. 48, p. 7-44, set. 2018. Disponível em: https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/16041/3/PRArt214083_Mercado%20de%20petroleo%20no%20Brasil_compl_P_BD.pdf. Acesso em 18 de novembro de 2020.

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES. Secretaria de Desenvolvimento Tecnológico e Inovação. **Plano de ciência, tecnologia e inovação para energias renováveis e biocombustíveis: 2018-2022/** Secretaria de Desenvolvimento Tecnológico e Inovação. Brasília. Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações. 2018. Disponível em: <https://antigo.mctic.gov.br/mctic/export/sites/institucional/tecnologia/tecnologiasSetoriais/Plano-de-Ciencia-Tecnologia-e-Inovacao-Para-Energias-Renovaveis-e-Biocombustiveis.pdf>. Acesso em 12 de janeiro de 2021.

MINISTÉRIO DA INDÚSTRIA, COMERCIO EXTERIOR E SERVIÇOS. Comex Stat. Portal para acesso gratuito às estatísticas de comércio exterior do Brasil. Disponível em: <http://comexstat.mdic.gov.br/pt/home>. Acesso em 07 de março de 2021.

MINISTÉRIO DE DESENVOLVIMENTO, INDÚSTRIA E COMERCIO EXTERIOR. A indústria química e o setor de fertilizantes. BNDES. Disponível em: <http://www.bndes.gov.br/bibliotecadigital>. Acesso em 12 de janeiro de 2021.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Roteiro para Estruturação da Economia do Hidrogênio no Brasil.** (Coordenação geral: MME - Ministério de Minas e Energia; Integração Técnica: MCT - Ministério de Ciência e Tecnologia; Operação: LACTEC/UFPR; Sub-coordenações: UNICAMP, CENPES, COPPE/UFRJ e INMETRO). 2005. Versão Beta.

_____. Empresa de Pesquisa Energética. **Informe: Comparações de preços de gás natural. Brasil e países selecionados.** Rio de Janeiro. 2019. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-369/INFORME%20-%20Compara%C3%A7%C3%B5es%20de%20Pre%C3%A7os%20de%20G%C3%A1s%20Natural.pdf>. Acesso em 12 de janeiro de 2021.

_____. Empresa de Pesquisa Energética. **Plano Nacional de Energia 2050.** Brasília. MME/EPE. 2020a. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/plano-nacional-de-energia-pne>. Acesso em 12 de janeiro de 2021.

_____. Empresa de Pesquisa Energética. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2029.** Brasília. MME/EPE. 2020b. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Documents/PDE%202029.pdf>. Acesso em 12 de janeiro de 2021.

NEW ENERGY COALITION. **Hydrogen Valley.** 2019. Disponível em: <https://www.newenergycoalition.org/en/hydrogen-valley/#:~:text=The%20HEAVENN%20project%20is%20unique,parties%20from%206%20European%20countries>. Acesso em 23 de novembro de 2020.

OBSERVATÓRIO DO CLIMA. **Análise das Emissões Brasileiras de Gases de Efeito Estufa e suas Implicações para as Metas do Brasil.** Disponível em: https://www.oc.eco.br/wp-content/uploads/2019/11/OC_SEEG_Relatorio_2019pdf.pdf. Acesso em 01 de março de 2021.

ONGENA, Jozef *et al.* **Hidden consequences of intermittent electricity production.** National Wind Watch. 2017. Disponível em: <https://www.wind-watch.org/documents/hidden-consequences-of-intermittent-electricity-production/>. Acesso em 23 de novembro de 2020.

PACE ENERGY. **Japan: A success story in deploying Fuel Cell micro-Cogeneration.** 2019. Disponível em: <http://www.pace-energy.eu/japan-a-success-story-in-deploying-fuel-cell-micro-cogeneration/>. Acesso em 23 de novembro de 2020.

PARNEL, John. **World's Largest Green Hydrogen Project Unveiled in Saudi Arabia.** Disponível em: <https://www.greentechmedia.com/articles/read/us-firm-unveils-worlds-largest-green-hydrogen-project>. Acesso em 26 de fevereiro de 2021.

PARTICIPA CONSULTAS PÚBLICAS. **“EN-H2 ESTRATÉGIA NACIONAL PARA O HIDROGÊNIO”.** 2020. Disponível em: <https://participa.pt/contents/consultationdocument/Estrategia%20Nacional%20para%20o%20Hidrogeno%20DRAFT%20publicac%C3%A7ao.pdf>. Acesso em 23 de novembro de 2020.

Patel, Sonal. **World's First Integrated Hydrogen Power-to-Power Demonstration Launched.** 2020. Power Magazine. Disponível em: <https://www.powermag.com/worlds-first-integrated-hydrogen-power-to-power-demonstration-launched>. Acesso em 23 de novembro de 2020.

PERILLI, David. **Green hydrogen for grey cement**. Global Cement. 2020. Disponível em: <https://www.globalcement.com/news/item/11061-green-hydrogen-for-grey-cement>. Acesso em 23 de novembro de 2020.

PORT OF ROTTERDAM. **Hydrogen in Rotterdam**. 2020. Disponível em: <https://www.portofrotterdam.com/en/doing-business/port-of-the-future/energy-transition/hydrogen-in-rotterdam>. Acesso em 23 de novembro de 2020.

PROGRAMA DE P&D DA ANEEL: Avaliação & Perspectivas. Organizadores: José de Castro, José Eduardo Cassiolato, Renata Lèbre La Rovere, Marcelo Pessoa de Matos, [et. al.]. Rio de Janeiro. Publit. 2020. Disponível em: http://gesel.ie.ufrj.br/app/webroot/files/publications/29_livro_ped_aneel.pdf. Acesso em 02 de março de 2021.

RENEWS Biz. **COVID-19: Green Deal to drive EU recovery effort**. 2020. Disponível em: <https://renews.biz/60572/covid-19-green-deal-to-drive-eu-recovery-effort/>. Acesso em 23 de novembro de 2020.

REPÚBLICA PORTUGUESA. **Governo aprova Estratégia Nacional para o Hidrogênio**. Julho 2020. Disponível em: <https://www.portugal.gov.pt/pt/gc22/comunicacao/noticia?i=governo-aprova-estrategia-nacional-para-o-hidrogenio>. Acesso em 23 de novembro de 2020.

ROSE, Robert. **ENE-FARM installed 120,000 residential fuel cell units**. H2 International. 2015. Disponível em: <https://www.h2-international.com/2015/09/21/ene-farm-installed-120000-residential-fuel-cell-units/>. Acesso em 23 de novembro de 2020.

SAE CHINA. Strategy Advisory Committee of the Technology Roadmap for Energy Saving and New Energy Vehicles. **Hydrogen Fuel Cell Vehicle Technology Roadmap**. Disponível em: https://docs.wixstatic.com/ugd/45185a_e975e82743f3496ca41fe3ccc94c6228.pdf. Acesso em 07 de fevereiro de 2021.

SIEMENS. **HYFLEXPOWER: The world's first integrated power-to-X-to-power hydrogen gas turbine demonstrator**. Disponível em: <https://press.siemens.com/global/en/pressrelease/hyflexpower-worlds-first-integrated-power-x-power-hydrogen-gas-turbine-demonstrator>. Acesso em 30 de agosto de 2020.

SIEMENS ENERGY. **A new hydrogen reality: Fuel from wind and water**. Disponível em: <https://www.siemens-energy.com/global/en/offerings/renewable-energy/hydrogen-solutions/haru-oni.html>. Acesso em 19 de fevereiro de 2021.

_____. **Welcome to a carbon-free world: Power-to-X unlocks enormous environmental and business potential**. Disponível em: <https://www.siemens-energy.com/global/en/news/magazine/2019/the-path-to-a-co2-free-future.html>. Acesso em 07 de setembro de 2020.

SIEMENS GAS AND POWER GMBH & CO. KG. **Power-to-X: A closer look at e-ammonia**. Disponível em: www.siemens-energy.com/hydrogen. Acesso em 24 de fevereiro de 2021.

SILVA, Ennio *et al.* **Descrição e previsão de resultados do sistema de armazenamento de energia elétrica sob a forma de hidrogênio da CESP instalado junto à UHE Eng. Sérgio Mota (Porto Primavera)**. Grupo de Estudo de Geração Eólica, Solar e Armazenamento-GES. XXV SNTPEE Seminário Nacional De Produção E Transmissão De Energia Elétrica. Belo Horizonte. 2019. Disponível em: <http://www.bvr.com.br/snpjee/xxvsnpjee/public/GES/3505.pdf>. Acesso em 12 de janeiro de 2021.

SMITH, Brett. **ENGIE and Nel Hydrogen: Electrolyzers for the World's Largest Hydrogen Mining Truck**. AZO Cleantech. 2020. Disponível em: <https://www.azocleantech.com/article.aspx?ArticleID=1107>. Acesso em 23 de novembro de 2020.

SNN, Northern. Netherlands Alliance. **EU SUPPORT FOR THE GREEN HYDROGEN**. 2020. Disponível em: <https://www.snn.nl/en/nieuws/eu-support-for-the-green-hydrogen-region-of-europe-northern-netherlands>. Acesso em 23 de novembro de 2020.

SUNITA, Satyapal. **"Departamento de Energia dos Estados Unidos"**. BW expo Summit Digital 2020. Disponível em: <https://www.bwdigital.org.br/>. Acesso em 23 de novembro de 2020.

TARTLER, Jens. **Grüner Treibstoff im Amazonas-Regenwald. Tagesspiegel Background**. 2021. Disponível em: <https://background.tagesspiegel.de/mobilitaet/gruener-treibstoff-im-amazonas-regenwald>. Acesso em 25 de janeiro de 2021.

THE WORLD BANK. **Report of the High-Level Commission on Carbon Prices. 2017**. Disponível em: https://static1.squarespace.com/static/54ff9c5ce4b0a53dec ccfb4c/t/59b7f2409f8dce5316811916/1505227332748/CarbonPricing_FullReport.pdf. Acesso em 05 de agosto de 2020.

TIMES OF INDIA. **Oil-free future: What is Saudi Arabia's Neom Project**. Disponível em: http://timesofindia.indiatimes.com/articleshow/8021285.cms?utm_source=contentofinterest&utm_medium=text&utm_campaign=cppst_2021. Acesso em 11 de janeiro de 2021.

TURBO MACHINERY INTERNATIONAL STAFF & CONTRIBUTORS. **What is Power to X**. 2020. Disponível em: <https://www.turbomachinerymag.com/what-is-power-to-x/>. Acesso em 23 de novembro de 2020.

TÜV SÜD. Power-To-X (PTX / P2X). Disponível em: <https://www.tuvsud.com/de-de/indust-re/klima-und-energie-info/power-to-x>. Acesso em 24 de fevereiro de 2021.

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY'S OFFICE OF ENERGY EFFICIENCY AND RENEWABLE ENERGY (EERE). **Hydrogen Production**. 2020. Disponível em: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-production>. Acesso em 23 de novembro de 2020.

VALOR ECONÔMICO - Empresas (2019). **Startups desenvolvem tecnologia para atender futura demanda pelo hidrogênio combustível**. (Por Andrea Vialli, Para o Valor, de São Paulo). 28 de março de 2019.

VISEDO, Gonzalo; PECCHIO, Marcelo. **ROADMAP TECNOLÓGICO DO CIMENTO: Potencial de redução das emissões de carbono da indústria de cimento até 2050**. Rio de Janeiro. SNIC. 2019. Disponível em: https://www.dropbox.com/s/9cbtj1c9oquigf8/Roadmap%20Tecnol%C3%B3gico%20do%20Cimento_Brasil.pdf?dl=0. Acesso em 24 de fevereiro de 2021.

WORLD ENERGY COUNCIL. **Hydrogen Study: International H2 Strategies**. Disponível em: <https://www.onthemosway.eu/wp-content/uploads/2020/12/World-Energy-Council.pdf>. Acesso em 25 de fevereiro de 2021.

XINHUA. The State Council. The People's Republic of China. **China to invest big in "Made in China 2025" strategy**. Disponível em: http://english.www.gov.cn/state_council/ministries/2017/10/12/content_281475904600274.htm. Acesso em 07 de fevereiro de 2021.

ZAINZINGER, V. **Trying to make green hydrogen work in Europe**. Chemical and Engineering News. 2020. Disponível em: <https://cen.acs.org/energy/hydrogen-power/Trying-make-green-hydrogen-work/98/i23>. Acesso em 23 de novembro de 2020.

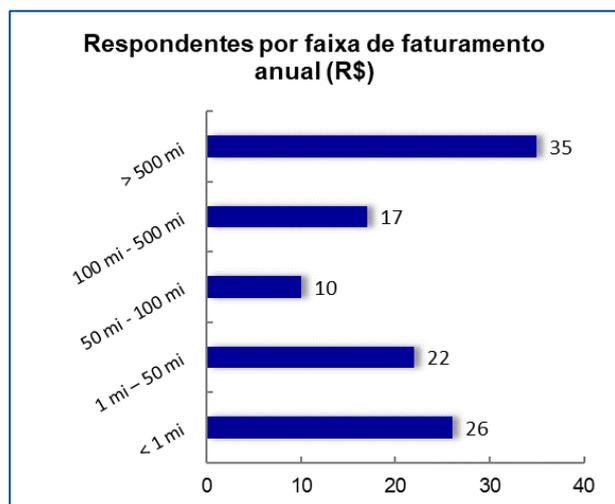
Anexo I – Questionário de pesquisa de opinião

Questões de 1 a 5

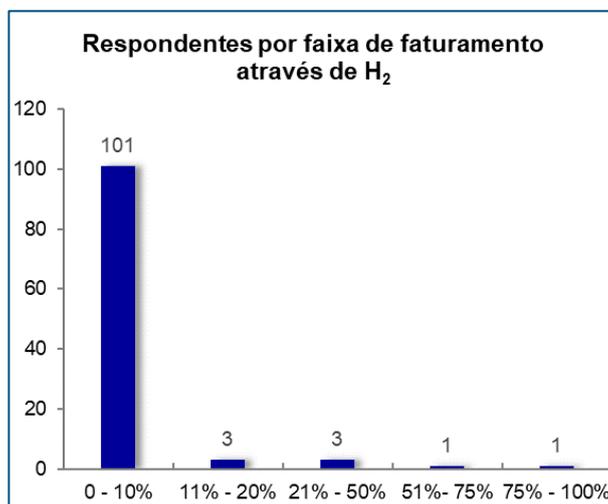
Nomes das empresas e contatos dos respondentes.

INFORMAÇÕES BÁSICAS

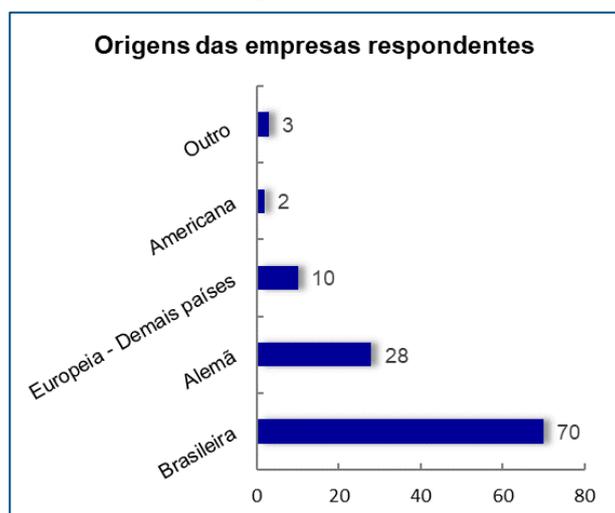
Questão 6 – Qual o faturamento anual da empresa?



Questão 7 - Qual é a porcentagem do seu faturamento feito através de H₂?



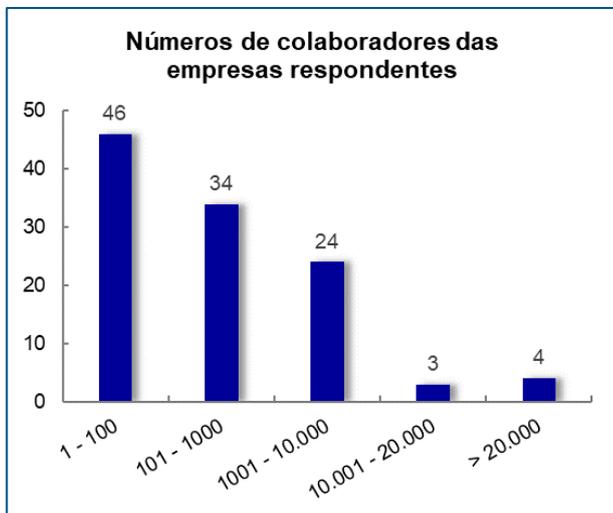
Questão 8 - Qual é a origem da empresa?



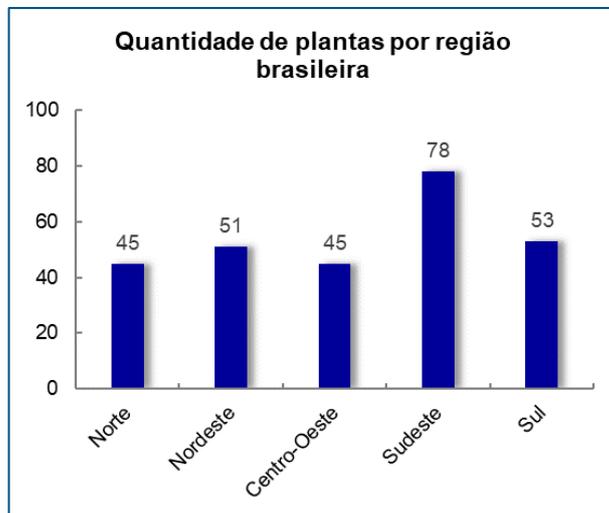
Questão 9 - Em qual estado está localizada a sede da empresa?



Questão 10 - Quantos colaboradores tem sua empresa no Brasil?



Questão 11 - Defina a quantidade de plantas que a empresa possui por região brasileira.



Questão 12 - Como sua empresa atua no setor de hidrogênio no Brasil?

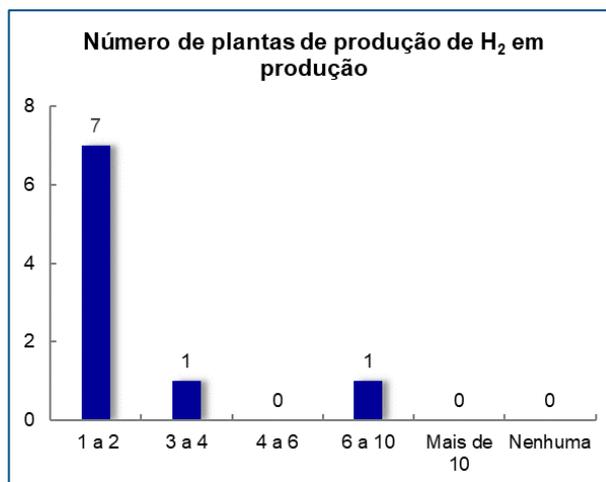


PRODUTOR & DISTRIBUIDOR

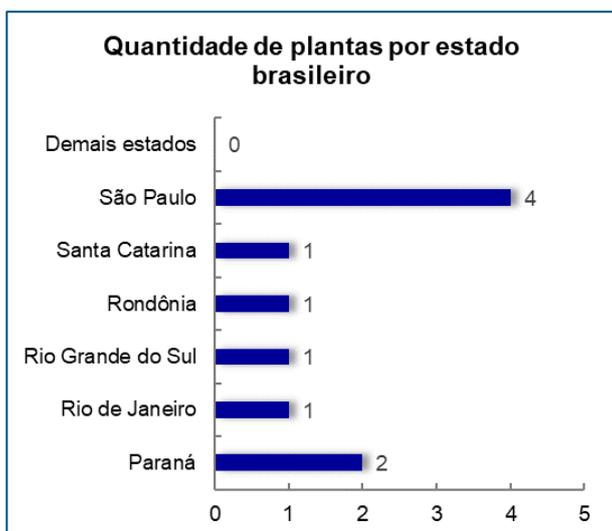
Questão 13 - Qual fonte/tecnologia sua empresa usa para produzir H₂ no Brasil? (permite mais de uma resposta)



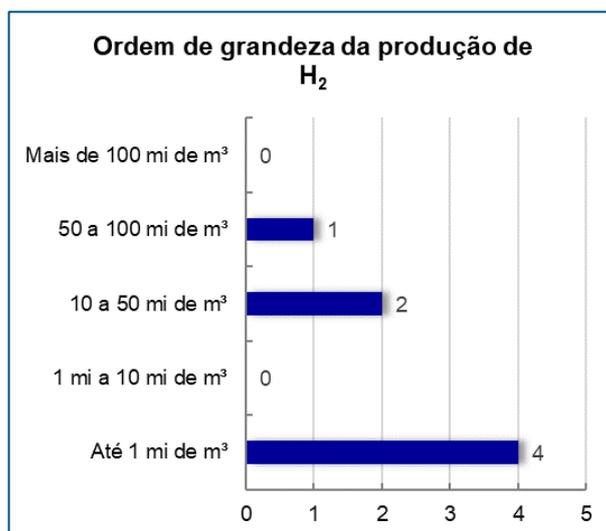
Questão 14 - Quantas plantas de produção sua empresa está operando?



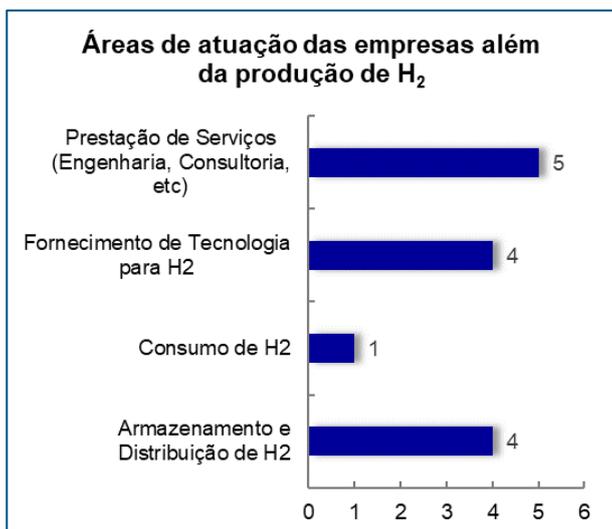
Questão 15 - Descreva a quantidade de plantas que a empresa possui por estado brasileiro.



Questão 16 - Qual a ordem de grandeza da produção?



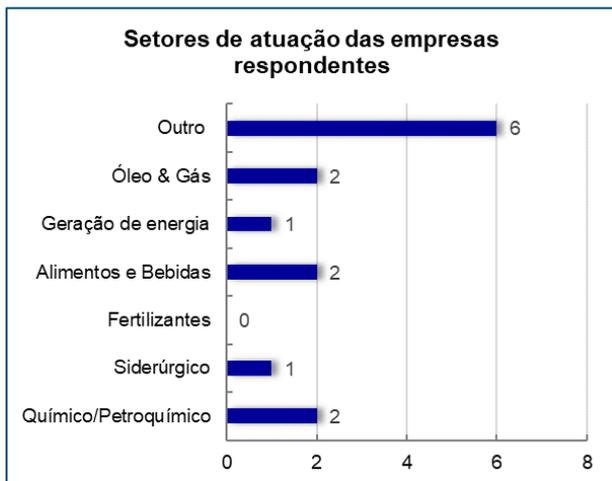
Questão 17 - Além de produção de hidrogênio, em quais outras áreas sua empresa atua comercialmente? (permite mais de uma resposta)



Questão 18 - Qual a expectativa de crescimento do faturamento com a venda de hidrogênio verde até 2030?



Questão 19 - Qual o setor em que sua empresa atua?



CONSUMIDORES

Questão 20 - Atualmente, para qual processo a empresa usa o hidrogênio?

1 resposta para:

"Somos um pequeno consumidor, basicamente no sistema do gerador elétrico. Mas somos grande produtor de hidrogênio eletrolítico (70N/m³) descartado para meio ambiente."

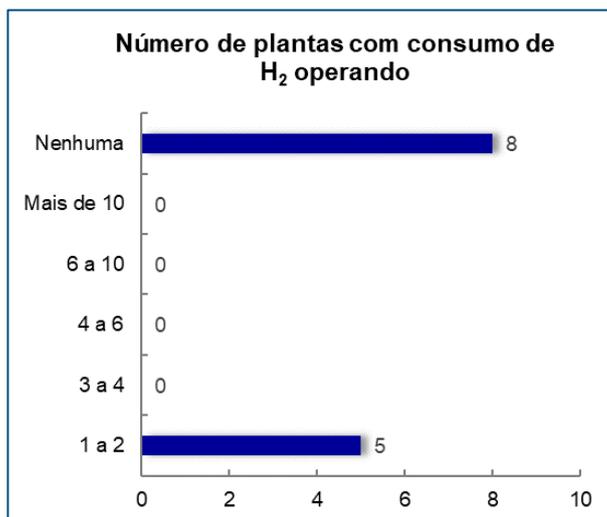
"Corte e requieima de vidro."

"Pesquisamos soluções para transporte rodoviário e aéreo com células de combustível a H₂."

"Fabricação de H₂O₂."

9 respostas para: "Nenhum."

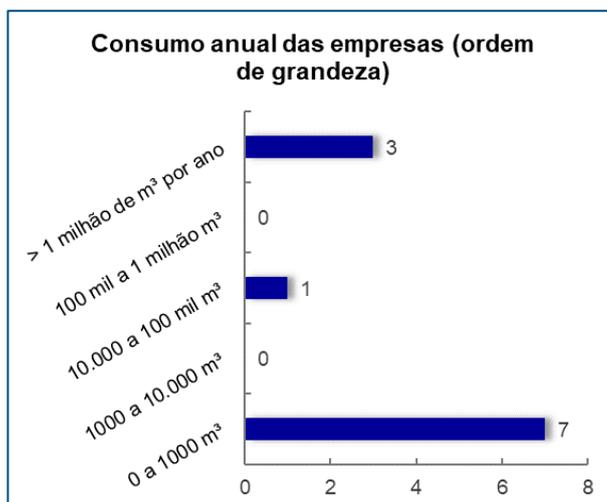
Questão 21 - Sua empresa está operando em quantas plantas com consumo de H₂?



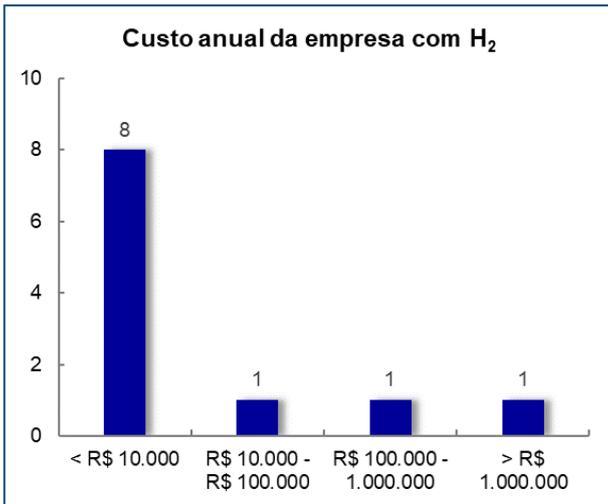
Questão 22 - Em quais estados estão localizadas as plantas? (permite mais de uma resposta)



Questão 23 - Qual a ordem de grandeza do consumo anual?



Questão 24 - Qual o custo anual da sua empresa com hidrogênio?



Questão 25 - Sua empresa considera a produção própria de hidrogênio baseado em fontes renováveis?

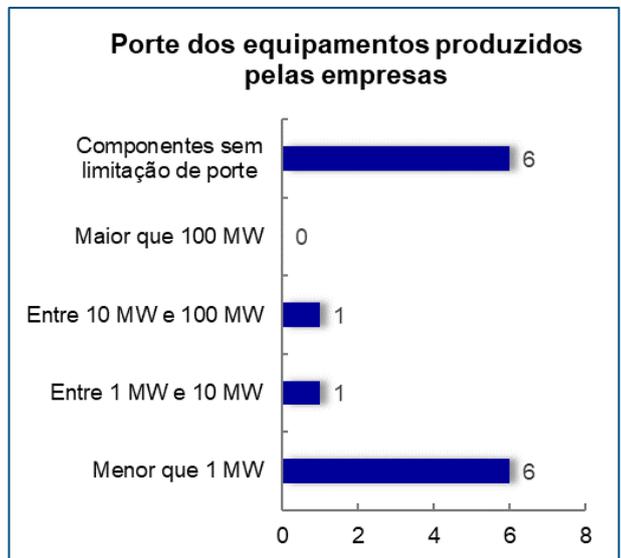


FABRICANTES DE EQUIPAMENTOS & COMPONENTES

Questão 26 - Qual(is) o(s) equipamento(s) fabricado(s) por sua empresa? (permite mais de uma resposta)



Questão 27 - Qual é o porte do(s) equipamento(s) produzido(s) por sua empresa?



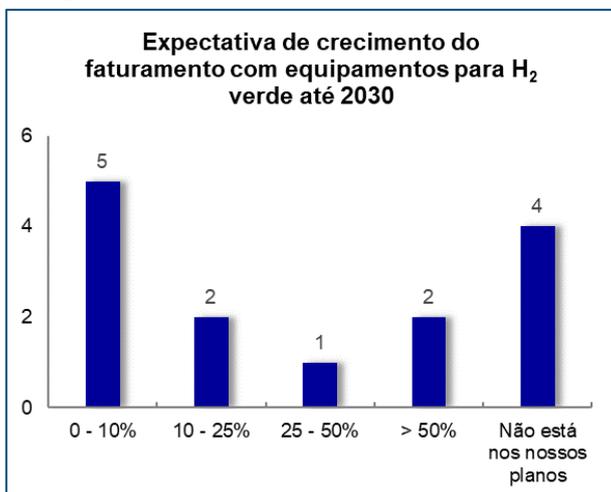
Questão 28 - Qual sua avaliação da maturidade de seus produtos se comparados aos produtos importados?



Questão 29 - Além de fornecimento de equipamentos/componentes para hidrogênio, em quais outros segmentos sua empresa atua? (permite mais de uma resposta)



Questão 30 - Qual a sua expectativa de crescimento do faturamento com equipamentos/componentes para hidrogênio verde até 2030?

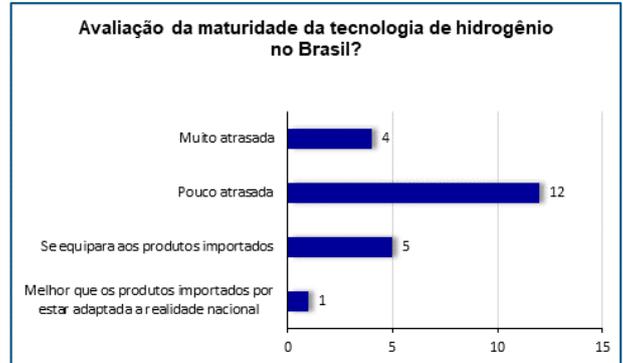


PRESTADORES DE SERVIÇOS

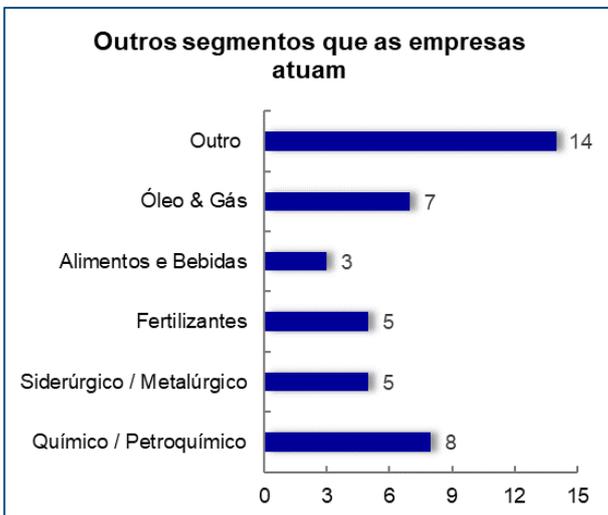
Questão 31 - Sua empresa presta serviço para qual área? (permite mais de uma resposta)



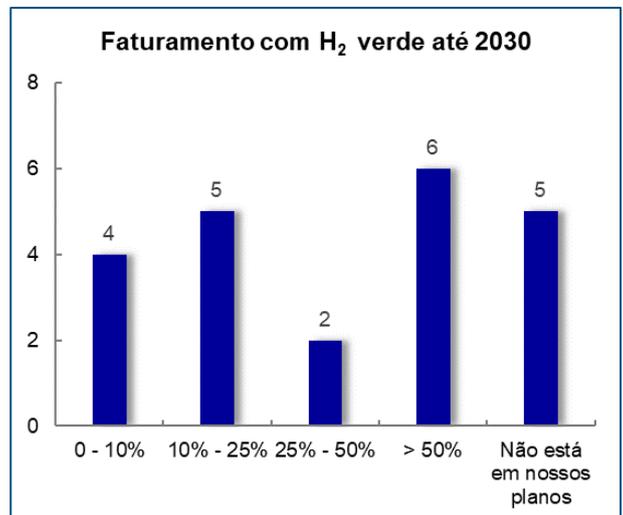
Questão 32 - Como avaliaria a maturidade da tecnologia de hidrogênio no Brasil?



Questão 33 - Além da prestação de serviço para a área de hidrogênio, em quais outros segmentos sua empresa atua? (permite mais de uma resposta)

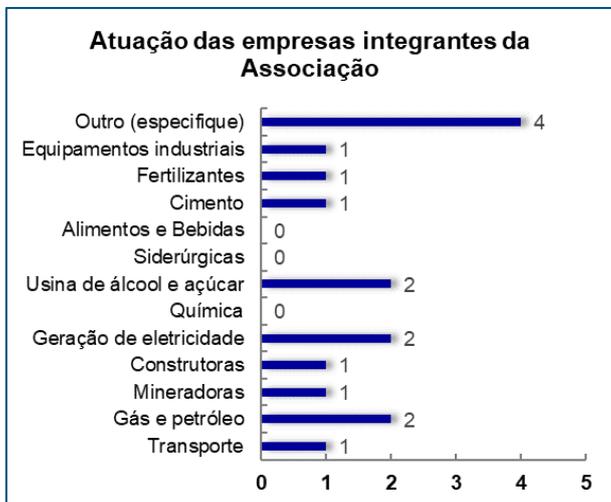


Questão 34 - Qual sua expectativa de crescimento do faturamento com hidrogênio verde até 2030?

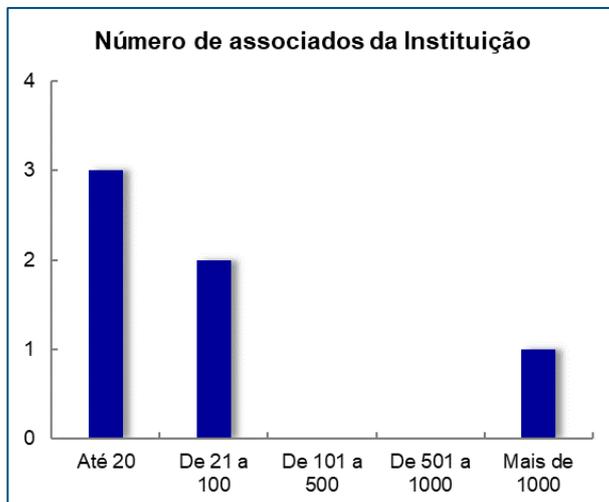


REPRESENTANTES SETORIAIS

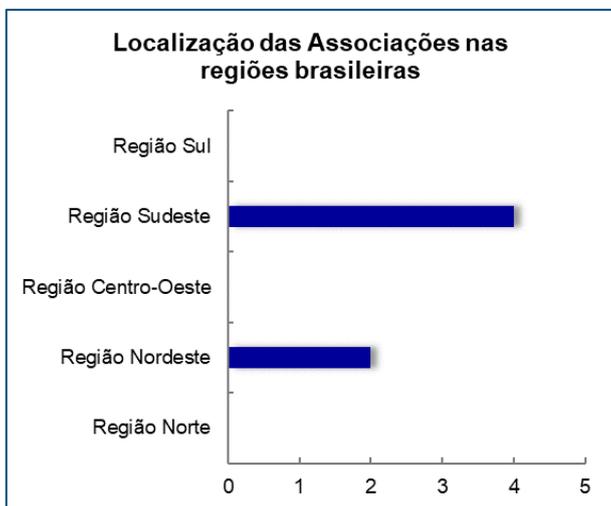
Questão 35 - Em qual(is) setor(es) atuam as empresas representadas por sua associação? (permite mais de uma resposta)



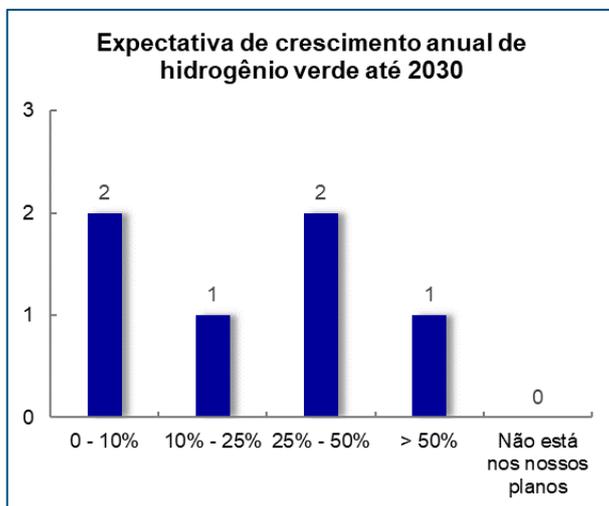
Questão 36 - Quantos associados possui a sua instituição?



Questão 37 - Qual a principal região brasileira onde estão localizados seus associados?

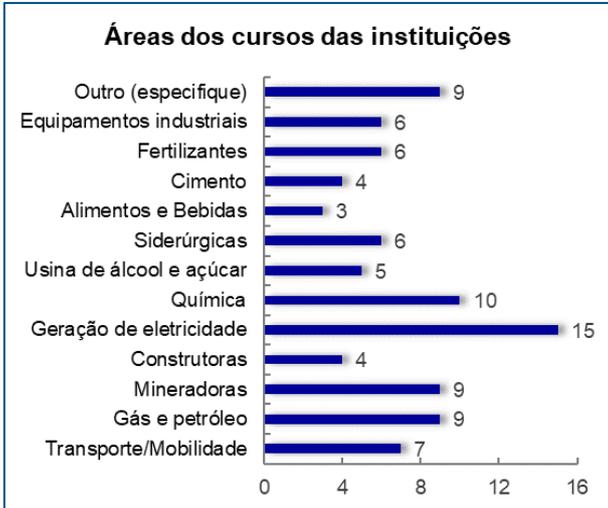


Questão 38 - Qual a sua expectativa de crescimento anual de hidrogênio verde até 2030?



PESQUISA & DESENVOLVIMENTO

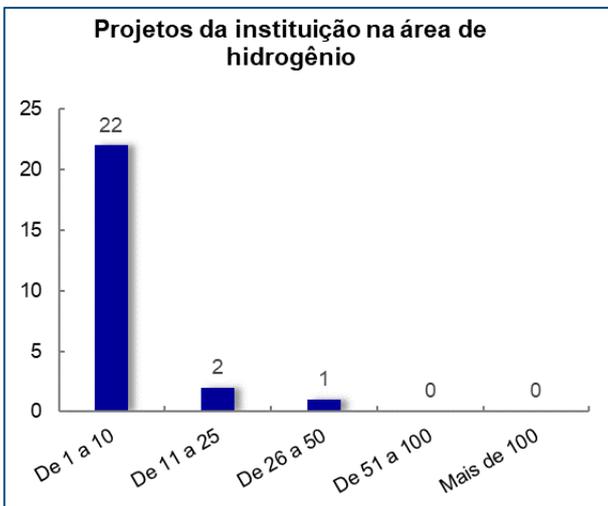
Questão 39 - Os cursos e pesquisas da instituição são focados em qual(is) área(s)/setor(es)? (permite mais de uma resposta)



Questão 40 - Atualmente, quantos grupos de pesquisa na área de hidrogênio a instituição possui?



Questão 41 - Quantos projetos na área de hidrogênio já foram realizados pela instituição?



INFORMAÇÕES GERAIS

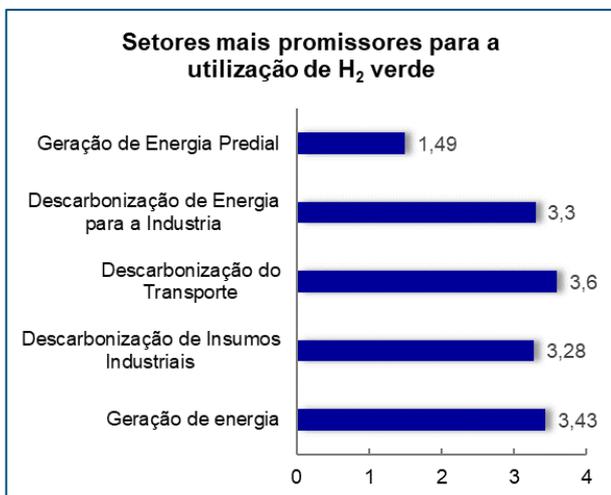
Questão 42 - Na sua opinião, qual das respostas abaixo mais se enquadra com o engajamento de sua empresa para a recuperação verde (*Green Recovery*), ou seja, repensar o modelo de negócio atual e trabalhar para uma recuperação econômica mais sustentável?



Questão 43 - Na sua opinião, quais são as vantagens estratégicas do Brasil para a implementação do hidrogênio verde?



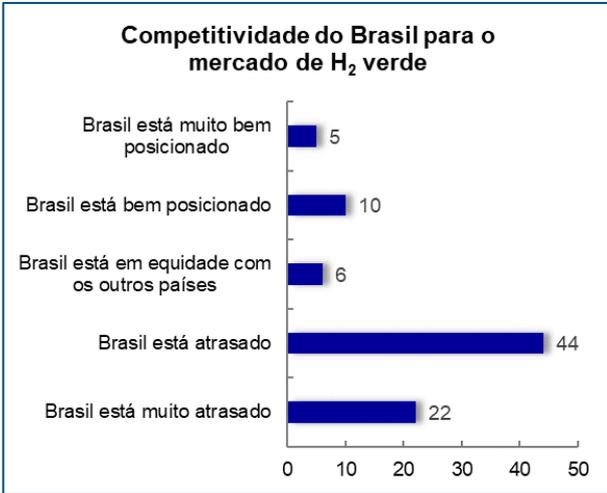
Questão 44 - Ordene quais os setores que, em sua opinião, são os mais promissores para a utilização de hidrogênio verde. (Utilize uma escala em que 1 é o mais promissor, e 5 o menos promissor)



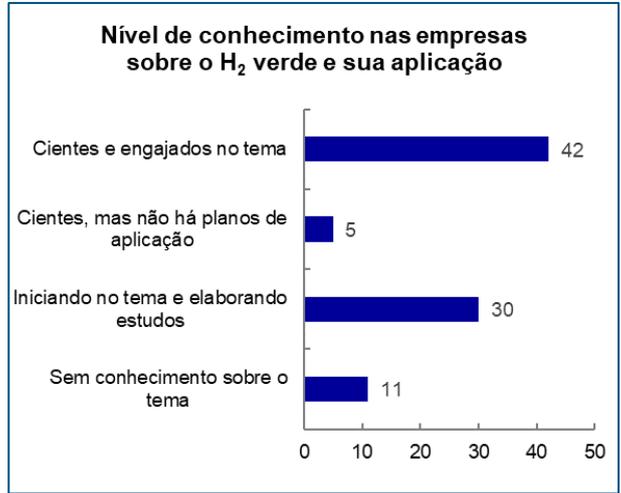
Questão 45 - Qual a sua expectativa para que o hidrogênio verde seja comercialmente competitivo?



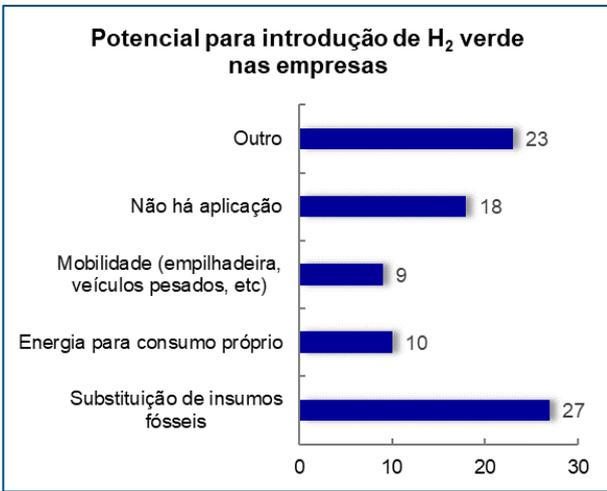
Questão 46 - Qual sua análise quanto a competitividade do Brasil para o mercado de hidrogênio verde?



Questão 47 - Na sua empresa, qual é o nível de conhecimento sobre o hidrogênio verde e sua aplicação?



Questão 48 - Na sua empresa, onde há maior potencial para introdução do hidrogênio verde?



Questão 49 - Em qual estágio de desenvolvimento para a substituição e aplicação de hidrogênio verde e célula combustível sua empresa se encontra?



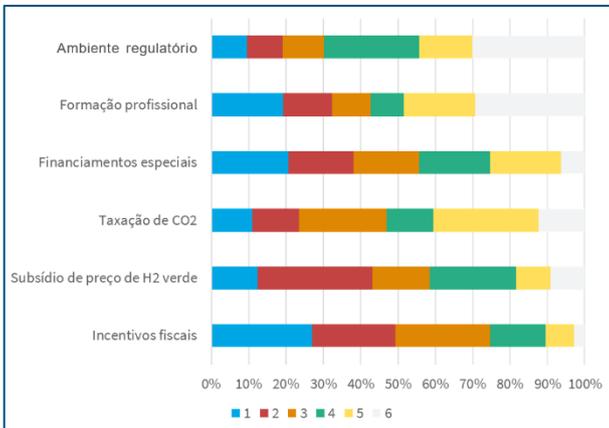
Questão 50 - Qual o interesse da sua empresa na produção de hidrogênio verde "in loco"?



Questão 51 - Atualmente, como classificaria as barreiras para a aplicação e desenvolvimento do hidrogênio verde na sua empresa?



Questão 52 - Quais os incentivos necessários para que sua empresa possa entrar no mercado de hidrogênio verde? (Utilize uma escala em que 1 é o mais necessário, e 6 o menos necessário)



Anexo II – Normatização em andamento para as tecnologias de hidrogênio

NORMA	ESCOPO ⁶¹
ISO/TC 197/WG 05	<i>Gaseous hydrogen land vehicle refueling connection devices</i> (Dispositivos de conexão de reabastecimento de veículos terrestres a hidrogênio gasoso)
ISO/TC 197/WG 15	<i>Gaseous hydrogen - Cylinders and tubes for stationary storage</i> (Hidrogênio gasoso - Cilindros e tubos para armazenagem estacionária)
ISO/TC 197/WG 18	<i>Gaseous hydrogen land vehicle fuel tanks and thermal pressure relief device</i> (Tanques de combustível de veículos terrestres a hidrogênio gasoso e dispositivo de alívio de pressão térmica)
ISO/TC 197/WG 19	<i>Gaseous hydrogen fueling station dispensers</i> (Distribuidores de estação de abastecimento de hidrogênio gasoso)
ISO/TC 197/WG 20	<i>Gaseous hydrogen fueling station valves</i> (Válvulas para estações de abastecimento de hidrogênio gasoso)
ISO/TC 197/WG 23	<i>Gaseous hydrogen fueling station fittings</i> (Acessórios para estações de abastecimento de hidrogênio gasoso)
ISO/TC 197/WG 24	<i>Gaseous hydrogen fueling stations – General requirements</i> (Estações de abastecimento de hidrogênio gasoso - Requisitos gerais)
ISO/TC 197/WG 25	<i>Hydrogen absorbed in reversible metal hydride</i> (Hidrogênio absorvido em hidreto de metal reversível)
ISO/TC 197/WG 26	<i>Hydrogen generators using water electrolysis</i> (Geradores de hidrogênio utilizando eletrólise de água)
ISO/TC 197/WG 27	<i>Hydrogen fuel quality</i> (Qualidade do combustível hidrogênio)
ISO/TC 197/WG 28	<i>Hydrogen quality control</i> (Controle de qualidade do hidrogênio)

⁶¹ Tradução nossa.

Anexo III – Roteiro de entrevistas

1. Considerando a sua experiência e a liderança da sua empresa neste setor, gostaríamos de contar com a sua colaboração para identificarmos o seguinte:
2. Qual é o consumo atual de hidrogênio no Brasil e quais são os seus principais consumidores?
3. Qual é a produção e quem são os principais produtores e localidades de produção de hidrogênio (cinza e verde)?
4. Na sua opinião, quais são os principais “stakeholders” no Brasil ao longo da cadeia de valor de hidrogênio verde e cinza, como produto PtX (empresas, representantes de indústria, institutos de pesquisa, órgãos governamentais etc.)?
5. Na sua opinião, quais são as principais tendências tecnológicas para a geração de hidrogênio no Brasil?
6. Em quais setores e áreas o hidrogênio verde poderia ser aproveitado como insumo energético (tanto consumo como armazenamento) no Brasil?
7. Qual é o seu posicionamento a respeito de introdução de hidrogênio verde na matriz energética brasileira?
8. Na sua opinião, quais seriam as vantagens estratégicas do Brasil para a implementação de um mercado de hidrogênio verde?
9. Na sua opinião, quais são os principais stakeholders do mercado de hidrogênio verde e PtX no mercado brasileiro?

