

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA
CURSO DE ENGENHARIA DE ENERGIA**

VIVIANNE ORTEGA DE LIMA

**Hidrogênio verde como fonte de energia: visão geral sobre iniciativas
regulatórias no Brasil**

**Bagé
2023**

VIVIANNE ORTEGA DE LIMA

Hidrogênio verde como fonte de energia: visão geral sobre iniciativas regulatórias no Brasil

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Energia da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Energia.

Orientadora: Sabrina Neves da Silva

Bagé

2023

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais).

L899h Lima, Vivianne Ortega
Hidrogênio verde como fonte de energia: visão geral sobre iniciativas regulatórias no Brasil / Vivianne Ortega Lima.
80 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) -- Universidade Federal do Pampa, ENGENHARIA DE ENERGIA, 2023.
"Orientação: Sabrina Neves da Silva".

1. Hidrogênio verde. 2. Regulamentações. I. Título.



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal do Pampa

VIVIANNE ORTEGA DE LIMA

HIDROGÊNIO VERDE COMO FONTE DE ENERGIA: VISÃO GERAL SOBRE INICIATIVAS REGULATÓRIAS NO BRASIL

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia de Energia da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para o Título de Bacharel em Engenharia de Energia.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em 19 de dezembro de 2023.

Bancada examinadora:

Prof. Dra. Sabrina Neves da Silva

Orientadora

UNIPAMPA

Prof. Dr. Enoque Dutra Garcia

UNIPAMPA

Prof. Dr. Luciano Vieceli Taveira

UNIPAMPA



Assinado eletronicamente por **ENOQUE DUTRA GARCIA, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 19/12/2023, às 21:53, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **SABRINA NEVES DA SILVA, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 19/12/2023, às 21:53, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **LUCIANO VIECELI TAVEIRA, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 19/12/2023, às 21:54, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1328303** e o código CRC **43F401D4**.

RESUMO

Este trabalho aborda o uso energético do hidrogênio como vetor de descarbonização. O hidrogênio pode ser obtido a partir de fontes como o gás natural e da água. Neste cenário, o hidrogênio verde (H2V) produzido a partir da água, por eletrólise, gerado a partir de fontes renováveis como energia eólica e solar. Isso tem impulsionado esforços em vários países para promover o desenvolvimento dessa tecnologia. O Brasil detém uma vantagem competitiva na produção de H2V em virtude do significativo potencial de energia eólica e solar. Assim, surgem espaços para a atração de investimentos. Além disso, o H2V pode ser utilizado para garantir a segurança dos sistemas energéticos e para cobrir o déficit de energia nos períodos de menor disponibilidade das energias renováveis intermitentes. No âmbito da transição energética, os países estão assumindo metas visando a redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE) para mitigar mudanças climáticas e firmar o desenvolvimento sustentável. Nesse viés, o H2V surge como vetor energético sustentável com potencial de substituir os combustíveis fósseis. Contudo, a integração do H2V na matriz energética enfrenta desafios, como a falta de um arcabouço regulatório, que garanta a segurança jurídica para atrair investimentos. Nesse sentido, o objetivo deste trabalho é analisar as regulamentações relacionadas à tecnologia do hidrogênio no Brasil e de seus desafios e oportunidades. Para isto, realizou-se um levantamento bibliográfico das normativas e projetos existentes e dos aspectos necessários à utilização deste vetor energético no contexto brasileiro. Observou-se que o mercado de hidrogênio carece de uma regulamentação abrangente. Atualmente, não existe uma base normativa que discipline todas as atividades econômicas associadas a esse mercado. Com a luta contra as mudanças climáticas assumindo um papel crucial, a demanda por soluções que conduzam à descarbonização da economia está crescendo globalmente.

Palavras-Chaves: hidrogênio; transição energética; energias alternativas; descarbonização.

ABSTRACT

This paper looks at the energy use of hydrogen as a vector for decarbonization. Hydrogen can be obtained from sources such as natural gas and water. In this scenario, Green hydrogen (H₂V) is produced from water by electrolysis, generated from renewable sources such as wind and solar energy. This has driven efforts in several countries to promote the development of this technology. Brazil has a competitive advantage in the production of H₂V due to its significant Wind and solar energy potential. This opens up opportunities for attracting investment. In addition, H₂V can be used to guarantee the security of energy systems and to cover energy shortages during periods when intermittent renewable energies are less available. As part of the energy transition, countries are setting targets to reduce Green house gas (GHG) emissions in order to mitigate climate change and establish sustainable development. With this in mind, H₂V has emerged as a sustainable energy vector with the potential to replace fossil fuels. However, the integration of H₂V into the energy matrix faces challenges, such as the lack of a regulatory framework that guarantees legal certainty to attract investment. The aim of this paper is to analyze the regulations related to hydrogen technology in Brazil and their challenges and opportunities. To this end, a bibliographical survey was carried out of existing regulations and projects and of the aspects necessary for the use of this energy vector in the Brazilian context. It was observed that the hydrogen market lacks comprehensive regulation. Currently, there is no regulatory basis governing all the economic activities associated with this market. With the fight against climate change taking on a crucial role, the demand for solutions that lead to the decarbonization of the economy is growing globally.

Keywords: hydrogen; energy transition; alternative energies; decarbonization.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Métodos de obtenção do hidrogênio	17
Figura 2 - Tecnologia de armazenamento de hidrogênio	19
Figura 3 - Obtenção do hidrogênio verde por eletrólise da água.....	23
Figura 4 - Projeções de custo.....	25
Figura 5 - Perspectiva de produção de hidrogênio cinza em diferentes países	26
Figura 6 - Classificação do hidrogênio por cores	28
Figura 7 - Eficiências de conversão de acordo com o processo de produção de hidrogênio.....	29
Figura 8 - Representação esquemática de rotas tecnológicas para obtenção e uso do hidrogênio.....	31
Figura 9 - Estimativas de representatividade do Hidrogênio na matriz energética até 2050	32
Figura 10 - Oportunidade associada à economia verde no Brasil até 2040	33
Figura 11 - Países que adotaram estratégias para uso do hidrogênio desde 2021 ..	37
Figura 12 - Potencial de hidrogênio na América Latina	40
Figura 13 - Estrutura do capítulo	42
Figura 14 - Ações governamentais para o H2 no Brasil	47
Figura 15 - Representação dos pilares essenciais para o desenvolvimento da economia do hidrogênio	48
Figura 16 - Eixos temáticos que compõem o PNH2.....	49
Figura 17 - Localidades favoráveis para cadeia de H2V	59

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Projetos de pesquisa de hidrogênio verde.....	18
Quadro 2 - Potencialidades e limitações dos projetos e normativa do Brasil.....	43
Quadro 3 - Ações governamentais de incentivo ao hidrogênio.....	52
Quadro 4 - Projetos e investimentos confirmados no Brasil de hidrogênio verde.....	55

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABH2	– Associação Brasileira de Hidrogênio
ANEEL	– Agência Nacional de Energia Elétrica
ANP	– Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
CAPES	– Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CENEH	– Centro Nacional de Referência em Energia do Hidrogênio
CGEE	– Centro de Gestão e Estudos Estratégicos
CNPE	– Conselho Nacional de Política Energética
COP 21	– 21º Conferência das Partes
COP27	– 27º Conferência das Partes
COP28	– 28º Conferência das Partes
EFTA	– Associação Europeia de Livre Comércio
EPE	– Empresa de Pesquisas Energéticas
EU	– União Europeia
FGV	– Fundação Getúlio Vargas
GEE	– Gases de efeito estufa
GW	– GigaWatts
H2	– Hidrogênio
H2V	– Hidrogênio verde
IEA	– International Energy Agency (IEA)
IEC	– International Electrotechnical Commission
IMS	– Iniciativa de Mercados Sustentáveis
IPEA	– Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada
IPHE	– Programa Internacional de Parcerias para o Hidrogênio e Células de Combustível
IRENA	– International Renewable Energy Agency
ISO	– International Organization For Standardization
MCTIC	– Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações
MME	– Ministério de Minas e Energia
ODS	– Objetivo do Desenvolvimento Sustentável
ONU	– Organização das Nações Unidas
PL	– Projeto de Lei
PNE	– Plano Nacional de Energia 2025
PNH2	– Programa Nacional do Hidrogênio
ProH2	– Programa de Ciência, Tecnologia e Inovação para a Economia de Hidrogênio
RCS	– Regulations, Codes and standards
UFRJ	– Universidade Federal do Rio de Janeiro
WBCSD	– O Conselho Empresarial Mundial para o Desenvolvimento Sustentável

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	Objetivo	12
1.2	Objetivos específicos	12
1.3	Justificativa	12
2	CONCEITOS GERAIS E REVISÃO DA LITERATURA	14
2.1	Hidrogênio: caracterização e propriedades.....	14
2.2	Produção, armazenamento e transporte do hidrogênio	16
2.2.1	<i>Produção</i>	16
2.2.2	<i>Armazenamento</i>	19
2.2.3	<i>Transporte</i>	21
2.3	Classificação por cores e perspectivas de desenvolvimento	22
2.4	O hidrogênio como vetor energético.....	30
2.5	A economia do hidrogênio	33
2.6	Experiências Internacionais	36
3	METODOLOGIA	41
3.1	Levantamento das regulamentações nacionais em vigor no Brasil.....	41
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	43
4.1	Histórico do desenvolvimento da tecnologia do H2V no Brasil.....	44
4.2	Plano Nacional do Hidrogênio - PNH2.....	47
4.3	Arcabouço regulatório brasileiro.....	50
4.4	Projetos nacionais em hidrogênio verde	54
4.4.1	<i>Perspectiva do hidrogênio no Rio Grande Do Sul</i>	57
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	62
	REFERÊNCIAS	64
	APÊNDICE A - Desafios descarbonização regulatórios para uso do hidrogênio como vetor de do setor energético	73

1 INTRODUÇÃO

A busca por fontes de energia limpa e renovável tornou-se crucial em um contexto global preocupado com as mudanças climáticas e a sustentabilidade ambiental. Nesse cenário, o hidrogênio aparece como uma promissora fonte de energia, oferecendo versatilidade, eficiência e emissões zero, em alguns casos. O aumento da demanda por hidrogênio como vetor energético requer uma compreensão profunda das regulamentações que o orientam na geração de energia, proporcionando segurança aos investidores e influenciando as políticas globais (Lameiras, 2019). A integração bem-sucedida do hidrogênio no setor energético está intrinsecamente relacionada à criação de regulamentações sólidas que promovam sua produção, armazenamento e transporte de maneira segura e eficiente (Castilla, 2020).

No Brasil, a busca por alternativas energéticas mais sustentáveis, incluindo o hidrogênio, tem ganhado destaque. O desenvolvimento de políticas públicas e projetos de lei, especialmente no Rio Grande do Sul, refletem esta tendência (Oliveira, 2022).

O conjunto de leis e normas específicas para regular o uso deste recurso como fonte de energia, apresenta uma deficiência crítica. Portanto, indaga-se que normativas estão sendo usadas para regular o uso do hidrogênio no país, sobretudo nos pontos mais críticos, que são o armazenamento e transporte (Silva, 2022).

No cenário brasileiro, a falta de regulamentação específica para estas duas fases, armazenamento e transporte, apresenta desafios significativos para projetos energéticos, resultando em adaptações normativas.

No contexto da busca por energias limpas e renováveis, o hidrogênio emerge como uma promissora alternativa. Portanto, compreender e moldar a regulamentação do hidrogênio é essencial para garantir uma transição energética bem-sucedida e sustentável.

A descrição da atual situação do hidrogênio como fonte de energia no Brasil é central nesta pesquisa, com destaque para as normativas e regulamentações que direcionam seu uso. Adicionalmente, esta investigação contempla a particularidade regional, trazendo como exemplo as normativas e, sobretudo, os projetos relativos ao hidrogênio no estado do Rio Grande do Sul. Isto possibilita uma compreensão mais precisa e profunda das políticas e regulamentações específicas que podem

influenciar na consolidação e no desenvolvimento do hidrogênio como fonte de energia nessa região do país.

Nesse sentido, o objetivo aqui é a descrição das atuais regulamentações relacionadas à tecnologia do hidrogênio no Brasil e de seus desafios e oportunidades.

Para isto, será feito um levantamento bibliográfico das normativas e projetos existentes e dos aspectos necessários à utilização deste combustível no contexto brasileiro e de exemplos deste aproveitamento no Rio Grande do Sul.

1.1 Objetivo

O objetivo geral deste trabalho é analisar os principais desafios regulatórios pertinentes à inserção do hidrogênio verde como vetor energético no Brasil.

1.2 Objetivos específicos

Para se alcançar o objetivo geral os seguintes objetivos específicos foram traçados:

- a) analisar o histórico do desenvolvimento do hidrogênio verde do Brasil e o Estado brasileiro como agente incentivador na implantação de políticas públicas e na viabilização da inserção do H₂V na matriz energética;
- b) explorar os principais desafios acerca das formas de produção, fornecimento, armazenamento, distribuição e uso final do H₂V;
- c) identificar as principais iniciativas do Estado do Rio Grande do Sul para desenvolver regulamentações específicas relacionadas ao hidrogênio verde;
- d) estudar os cenários internacionais como experiência no campo de inovações regulatórias.

1.3 Justificativa

A busca por fontes de energia mais limpas, sustentáveis e eficientes tem se tornado uma prioridade global diante dos desafios apresentados pelas mudanças climáticas e pela crescente demanda energética. Nesse contexto, o hidrogênio

surgiu como uma alternativa promissora, capaz de desempenhar um papel crucial na transição para um sistema energético mais verde. No entanto, para que essa transição ocorra de maneira eficaz, é necessário considerar alguns fatores, como o quadro regulatório, o qual irá moldar o desenvolvimento, produção, distribuição e uso do hidrogênio.

Como resposta a essa carência normativa, observamos uma abordagem predominantemente descritiva na regulamentação do hidrogênio no Brasil. Esse estudo assim se justifica devido à carência de estudos aprofundados sobre o cenário regulatório específico para o hidrogênio no Brasil. Embora o país já tenha demonstrado interesse nesse recurso energético, ainda há lacunas significativas em relação às diretrizes normativas, padrões de qualidade, incentivos fiscais e outros aspectos regulatórios que irão definir o percurso do hidrogênio no Brasil. Além disso, a presente pesquisa visa, entre outros aspectos, fazer um levantamento de quais tipos de hiato normativo existem.

Por fim, o esclarecimento de incertezas na legislação sobre tecnologia do hidrogênio é importante para fornecer clareza aos investidores, pesquisadores e empresas que desejam participar ativamente do desenvolvimento dessa tecnologia no Brasil. Uma regulamentação sólida e eficaz é fundamental para atrair investimentos, promover inovações e garantir a segurança em todas as etapas de produção do hidrogênio.

2 CONCEITOS GERAIS E REVISÃO DA LITERATURA

Para a revisão de literatura, utilizou-se dos portais da CAPES, ANEEL, Google Search, GOV.BR. As publicações lidas têm em comum o fato de tratarem das propriedades e características do elemento hidrogênio, dos países que se utilizam desta fonte de energia e que possuem pesquisa avançada no que concerne a utilização deste combustível e a relação entre o hidrogênio e a sustentabilidade. Os textos buscados se restringiram a artigos, teses e notícias, que foram publicados de 2013 a 2023, obedecendo-se, portanto, ao critério de dez anos para a busca de uma literatura considerada atual, podendo haver exceções.

Para fazer esta pesquisa foram consultados artigos de periódicos, monografias e notícias. De forma a limitar o universo de textos lidos, fez-se primeiramente uma seleção através do título que deveria conter obrigatoriamente as palavras Hidrogênio e Lei ou termos correlatos. Em seguida, filtraram-se as publicações por meio da leitura do sumário, ou dos títulos de seção, que deveriam demonstrar que o texto tratava de um ou mais dos seguintes pontos: processo extração, propriedades físico-químicas, hidrogênio verde, e uso desta fonte de energia no exterior. Fontes de instituições de ensino, governamentais, jornais.

2.1 Hidrogênio: caracterização e propriedades

A descoberta do hidrogênio remonta a 1671, quando Robert Boyle (1627-1691) produziu o gás enquanto fazia experiências com ferro e ácido sulfúrico. Boyle descreveu a reação e chamou esse gás de “solução inflamável de ferro”. Quase um século depois, em 1766, Henry Cavendish (1731-1810) produziu gás sobre o mercúrio e o reconheceu como um elemento distinto. Ele explicou suas propriedades, mas não conseguiu conceituá-lo corretamente, descrevendo-o como “ar inflamável de metais”, pois pensava que o gás era liberado do metal em vez do ácido. Antoine Lavoisier (1743-1794) reconheceu a natureza do gás (1783) e deu-lhe o seu nome atual, “hidrogênio”, composto por duas palavras gregas “hidro” que significa água e “genes” que *significa formação* (Abdinet *al.*, 2020)

O hidrogênio é um elemento químico, com a simbologia H com composição atômica simples, consistindo de um único próton e um elétron. É um dos elementos

mais comuns na natureza, com características únicas, isto é, não se assemelha a nenhum outro elemento químico, não sendo nem metal nem ametal. Está presente em aproximadamente 76% da massa do universo e 93% dos átomos (Estevão, 2008), mesmo assim é raramente encontrado em sua forma pura, na forma gasosa (H_2), estando sempre combinado com outros elementos, tais como oxigênio, carbono, nitrogênio, entre outros (Lameiras, 2019).

Trata-se de um gás inodoro e incolor. Segundo Estevão (2008), o hidrogênio é caracterizado por sua insipidez, é uma substância menos densa que o ar, com massa volumétrica de $0,08967 \text{ kg/m}^3$. Possui elevada energia por unidade de massa, superando muitos combustíveis.

Como não está livre na natureza, conforme mencionado anteriormente, não pode ser considerado como uma fonte de energia primária, tal como combustíveis fósseis, nucleares ou bicomustíveis, mas sim como um vetor de energia (Santos, Júnior, 2004).

Por conta das suas temperaturas de mudança de fase, o hidrogênio exibe propriedades específicas. Como discutido por Estevão (2008), a mudança da fase líquida para gasosa ocorre a $-252,88^\circ\text{C}$, enquanto seu ponto de fusão é $-259,20^\circ\text{C}$. O hidrogênio é um importante vetor energético e desempenha um papel fundamental na indústria e na produção de energia.

A quantidade de energia por massa é alta, uma característica que faz com que o hidrogênio tenha grande importância para aplicações de geração e armazenamento de energia. O hidrogênio é muito inflamável no ar, entre 4% e 75% por volume de ar. A energia necessária para inflamá-lo é pequena e, em algumas condições, pode ocorrer autoinflamação. A energia necessária para a ignição de uma mistura hidrogênio/ar é de apenas 0,04 mili Joules (mJ), contra 0,25 mJ dos hidrocarbonetos. A chama do hidrogênio é bastante quente, sendo a sua densidade energética de 38 kWh/kg (Linardi, 2008). É fato que todas essas características colocam o hidrogênio como um combustível bastante eficiente, entretanto, também traz grandes implicações para seu uso, devido a sensibilidade na ignição (Estevão, 2008).

2.2 Produção, armazenamento e transporte do hidrogênio

No contexto da transição energética, várias nações têm assumido compromissos significativos, como os estabelecidos na Agenda 2030 da Organização das Nações Unidas (ONU) e no Acordo de Paris de 2015. O principal objetivo desses compromissos é a redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE), visando mitigar os impactos das mudanças climáticas e promover o desenvolvimento sustentável (Martins, 2023).

Conforme já mencionado, o H₂ está associado ao petróleo, carvão, metano, água, gás natural, proteínas, carboidratos e vegetações. Dessa forma, para separar os átomos de hidrogênio dos outros elementos são necessários processos específicos ou, o H₂ pode ser coletado como subproduto em processos industriais (Moraes, 2022).

2.2.1 Produção

Apesar de poluentes, estes processos são os únicos meios para a obtenção da substância. A produção de H₂ a partir de combustíveis fósseis é considerada a principal forma para obtê-lo. O gás natural é a principal matéria prima utilizada, respondendo por cerca de 75% da produção global de hidrogênio, seguido pelo carvão, que responde por 23%. O restante da produção de hidrogênio (cerca de 2%) vem de petróleo, eletricidade e a biomassa (International Energy Agency, 2022; Souza, 2018).

Os processos de obtenção do hidrogênio são essenciais para a obtenção da substância. A partir da biomassa, por exemplo, há a aplicação de métodos como a pirólise e a gaseificação. A pirólise envolve a decomposição térmica da biomassa em temperaturas elevadas, gerando uma mistura de gases, incluindo o hidrogênio (Oliveira, 2022). Por outro lado, a gaseificação transforma a biomassa em um gás de síntese composto por hidrogênio, monóxido de carbono e dióxido de carbono (Fukurozaki, 2011).

No caso do carvão, o processo de gaseificação também é utilizado. Ele envolve a conversão do carvão em um gás de síntese composto por hidrogênio, monóxido de carbono e dióxido de carbono. Outra fonte, o gás natural, passa por um processo conhecido como reforma a vapor do metano, o qual consiste na reação do

metano com vapor de água, gerando hidrogênio e monóxido de carbono (De Lara; Richter, 2023). No entanto, o método mais limpo e conhecido para a obtenção de hidrogênio é a eletrólise da água. A seguir, na Figura 1, podem-se observar diferentes matérias primas e os métodos de produção de hidrogênio.

Figura 1 - Métodos de obtenção do hidrogênio

Matéria-prima	Método de produção	Eficiência energética	Fonte
Água	Eletrolise alcalina	61-82%	Parra <i>et al.</i> (2019)
Biomassa	Termólise via pirólise	35-50%	Dawood, Anda e Shafiullah (2020)
Biomassa	Termólise via gaseificação	35-50%	El-Emam e Özcan (2020)
Carvão	Termólise via gaseificação	74-85%	Mah <i>et al.</i> (2019)
Hidrocarbonetos	Processo de oxidação parcial de combustíveis fósseis	60-75%	Pinsky <i>et al.</i> (2020)
Gás natural	Reforma do metano a vapor	74-85%	Pinsky <i>et al.</i> (2020)

Fonte: De Lara; Richter (2023, p. 417).

Para Rangel, Silva e Paiva (2008) O avanço dos sistemas de energia fundamentados no uso do hidrogênio, aliado à sua integração com fontes renováveis, tem-se revelado um processo significativo, oferecendo benefícios diversificados conforme as aplicações. Este desenvolvimento demonstra um considerável potencial em sistemas autônomos, móveis e portáteis. Entretanto, a realização plena do potencial das pilhas de combustível e do hidrogênio ainda enfrenta desafios tecnológicos, econômicos e de aceitação que só podem ser superados por meio de investimentos substanciais em Investigação e Desenvolvimento, Educação, Formação e Divulgação direcionadas para as próximas gerações, bem como pela sensibilização dos diversos intervenientes

A regulamentação desempenha um papel crucial no transporte e armazenamento de hidrogênio. Normas de segurança rigorosas são essenciais, considerando a inflamabilidade do hidrogênio. Além disso, a harmonização de regulamentações entre diferentes países é vital para facilitar o comércio internacional de hidrogênio e garantir padrões consistentes de segurança (Paiva, 2022).

As potencialidades delineadas, no quadro a seguir, emergem como soluções viáveis para superar as dificuldades inerentes à produção, armazenamento e

transporte do hidrogênio. No entanto, é crucial reconhecer que a implementação efetiva dessas ações, leis e projetos enfrenta desafios substanciais. Essas iniciativas representam apenas um ponto inicial no esforço contínuo para iniciar o desenvolvimento do hidrogênio no Brasil. A superação dos obstáculos iniciais é fundamental para pavimentar o caminho para um setor de hidrogênio robusto e sustentável no país.

A produção de hidrogênio verde está experimentando um notável aumento de interesse e investimento nos últimos anos, impulsionado pela necessidade global de reduzir as emissões de carbono e atender às metas ambientais. Esse crescimento na demanda está impulsionando o desenvolvimento e aprimoramento de tecnologias emergentes para a produção de hidrogênio verde (Borges, 2022).

A produção de hidrogênio verde está se tornando cada vez mais uma iniciativa global, com países e empresas colaborando em projetos conjuntos para aproveitar recursos naturais disponíveis, compartilhar conhecimentos e promover a adoção generalizada. Nesse cenário, o ambiente regulatório desempenha um papel crucial, com muitos países implementando regulamentações favoráveis e oferecendo incentivos financeiros para estimular investimentos e acelerar a transição para uma economia baseada em hidrogênio verde (Bezerra, 2021).

Quadro 1 - Projetos de pesquisa de hidrogênio verde

Empresa	Valor (R\$)	Local
AES Tietê Energia S/A, Hytron e Instituto Avançado de Tecnologia e Inovação (Iati)	4,2 milhões	São Paulo
AES Tietê Energia S/A, Unicamp, Institutos Aqua Genesis e Hytron	2 milhões	São Paulo
Companhia de Transmissão de Energia Elétrica Paulista (Cesp)	30 milhões	Rio Paraná, entre São Paulo e Mato Grosso do Sul
Anglo American	-	Minas Gerais
Furnas Centrais Elétricas S/A	-	Usina de Itumbiara
UFC	-	Ceará
Coppe/UFRJ	-	UFRJ
Global EnvironmentFacilities (GEF)	-	São Paulo
Itaipu Binacional, Eletrobras e a Fundação Parque Tecnológico Itaipu (FPTI)	-	Parque tecnológico Itaipu, Foz do Iguaçu
Ergostech	-	Brasil
Guascor do Brasil Ltda, Grupo de Estudos do Setor Elétrico (Gesel) e Instituto de Energia (Iepuc)	-	Rio de Janeiro

Fonte: Oliveira (2022).

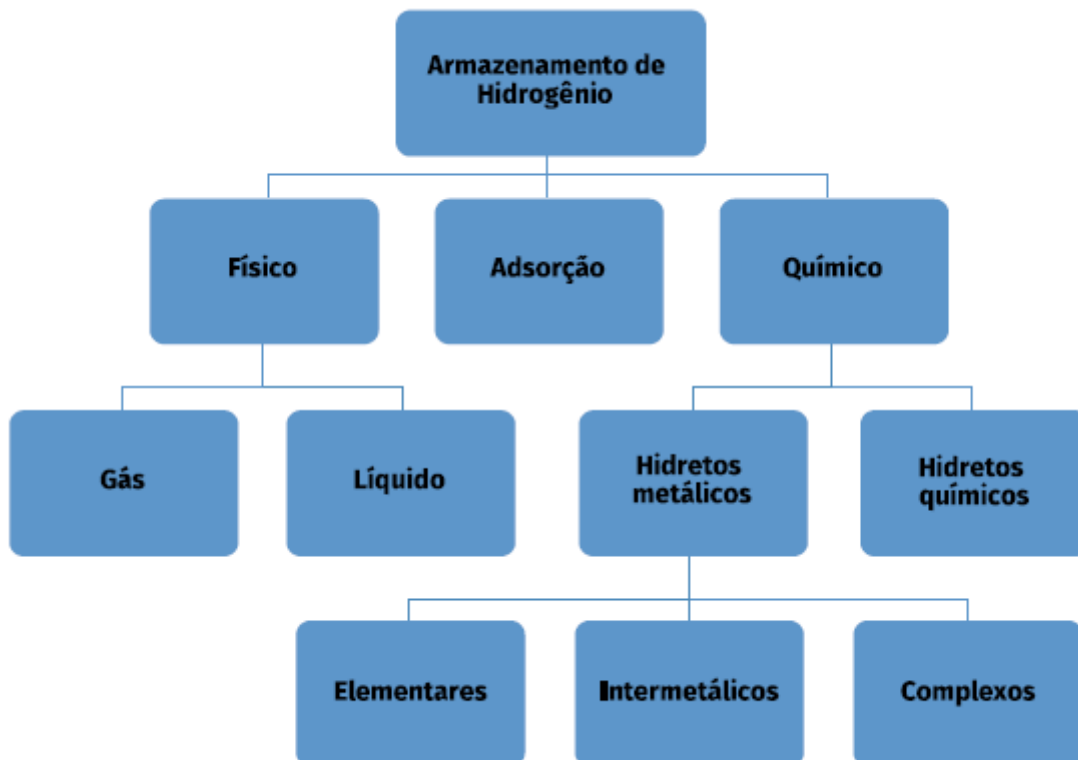
No quadro anterior, é possível observar uma relação abrangente de nove projetos de pesquisa dedicados ao desenvolvimento do hidrogênio verde, destacando iniciativas relevantes no campo.

Apesar dos desafios presentes, o cenário atual da produção de hidrogênio verde é otimista, indicando um potencial significativo de crescimento futuro. À medida que a tecnologia se aprimora, os custos diminuem e os investimentos continuam, espera-se que o hidrogênio verde desempenhe um papel cada vez mais central na transição global para fontes de energia mais limpas e sustentáveis.

2.2.2 Armazenamento

O hidrogênio pode ser armazenado de diferentes formas (FIGURA 2), de acordo com a tecnologia de produção, logística, transporte/distribuição e do uso final existente (Castro, 2023).

Figura 2 - Tecnologia de armazenamento de hidrogênio



Fonte: Castro *et al.* (2023, p. 19).

O armazenamento de hidrogênio verde é uma parte crítica da cadeia de valor associada a essa fonte de energia renovável. Primeiramente, o hidrogênio produzido

por meio de processos como a eletrólise é geralmente armazenado em uma forma comprimida. Este método envolve a compressão do hidrogênio a altas pressões, muitas vezes em torno de 350 a 700 bar, para reduzir seu volume e facilitar o transporte e a armazenagem. O hidrogênio comprimido é frequentemente acondicionado em cilindros ou tanques adequados (Bezerra, 2021).

Outra abordagem comum para armazenar hidrogênio é a liquefação. Nesse método, o hidrogênio é resfriado a temperaturas extremamente baixas, em torno de -253°C , transformando-o em um líquido. O hidrogênio líquido ocupa um volume ainda menor do que o hidrogênio comprimido, facilitando seu transporte e armazenamento em grandes quantidades. No entanto, a liquefação requer infraestrutura especializada devido às condições de temperatura extremamente baixas (Borges, 2022).

Para aplicações estacionárias, como armazenamento em plantas industriais ou instalações de energia, o hidrogênio pode ser absorvido em materiais porosos conhecidos como materiais de armazenamento de hidrogênio. Esses materiais, como hidretos metálicos ou carbono ativado, podem absorver e liberar hidrogênio conforme necessário, proporcionando uma forma compacta e eficiente de armazenamento (Russ, 2020).

O armazenamento do hidrogênio apresenta alguns riscos, ocasionados por fatores como defeitos de material e corrosão. Comumente, os incidentes nos dutos de distribuição ocorrem devido a vazamentos, pois quanto maior a concentração de hidrogênio no ponto de liberação, maior é o perigo (Click Petróleo e Gás, 2022).

O hidrogênio pode ser armazenado de duas maneiras principais: como gás comprimido ou em estado líquido. Quando armazenado como gás comprimido, é mantido em cilindros de alta pressão em temperatura acima de -253°C , o que permite o armazenamento em sistemas pressurizados. Essa técnica é vantajosa devido ao seu menor gasto de energia em comparação com o estado líquido, tornando-o apto para ser transportado por meio de gasodutos, da mesma forma que o gás natural (Estevão, 2008).

Armazenar em gasodutos também pode ser uma opção para o H_2 gasoso. Uma rede de gasodutos funciona como um grande reservatório que opera em pressões intermediárias entre os gasômetros e os cilindros pressurizados. A temperatura do gás varia com a temperatura ambiente e o volume corresponde à extensão e ao diâmetro da tubulação. Considerando um gasoduto de 1.000 km de

extensão, 0,50 m de diâmetro e operando com uma pressão de 20 atm, tem-se um total de 325 toneladas de H₂ (Santos Júnior, 2004).

Em gasodutos, o volume de gás armazenado varia quase que na mesma proporção da variação da pressão de operação, assim considerando sua extensão e volume, uma pequena variação na pressão de operação resultaria em uma alteração na quantidade de gás acumulado no sistema. Como desvantagens da utilização de gasodutos para o armazenamento de hidrogênio destacam-se além da sua longa extensão, problemas com a manutenção da rede de dutos (Moraes, 2022). No armazenamento em estado líquido, o hidrogênio requer temperatura abaixo de baixas de -253°C e precisa de sistemas criogênicos para acondicioná-lo.

Os processos de liquefação utilizam uma combinação de compressores, trocadores de calor, expansores e válvulas para obter o resfriamento desejável (Moraes, 2022). Entretanto, esse método demanda um elevado gasto de energia, cerca de 25% a 30% da sua energia total, para manter-se nesse estado (Silveira, 2021). O resfriamento exige procedimentos e materiais especiais, consumindo uma grande quantidade de energia elétrica para resfriar até mesmo uma pequena quantidade de hidrogênio. Por exemplo, para resfriar 0,5 kg de hidrogênio, é necessário um consumo energético de aproximadamente 5 kWh de energia elétrica (Estevão, 2008).

2.2.3 Transporte

A questão do transporte também é essencial no armazenamento de hidrogênio verde. Pode-se utilizar navios-tanque especializados ou mesmo tubulações dedicadas para transportar grandes volumes de hidrogênio para locais de armazenamento ou pontos de uso, embora desafios logísticos e econômicos ainda precisem ser superados (Rangel; Silva ; Paiva, 2008)

O transporte de hidrogênio, embora crucial para sua distribuição eficiente, apresenta desafios significativos que influenciam diretamente a necessidade de aprimoramentos tecnológicos e regulamentação apropriada. Atualmente, o transporte de hidrogênio é frequentemente realizado por meio de caminhões-tanque ou navios-tanque especializados. Esses veículos são projetados para lidar com as características específicas do hidrogênio, como sua baixa densidade e alta inflamabilidade (Rangel; Silva; Paiva, 2008; Moraes, 2022).

Contudo, para otimizar o transporte, é imperativo desenvolver métodos mais eficientes e sustentáveis. A pesquisa está em andamento para explorar opções como tubulações dedicadas para transportar hidrogênio, aproveitando a infraestrutura existente em algumas regiões. Essa abordagem poderia reduzir os custos e a pegada de carbono associados ao transporte por veículos individuais (Oliveira, 2022).

O Projeto de Lei 725/2022 almeja autorizar a utilização de gasodutos para o transporte de hidrogênio, proporcionando a reutilização dessas infraestruturas. Isso permitiria a adaptação das normativas destinadas ao gás natural, tanto no que se refere ao armazenamento quanto ao transporte, para abranger também o hidrogênio.

Outra área que precisa de aprimoramento é o transporte internacional de hidrogênio. A logística de navios-tanque pode ser cara e complexa e a busca por métodos mais eficazes, como o transporte de hidrogênio na forma de amônia ou líquidos orgânicos, está sendo explorada. Isso poderia facilitar o transporte em grande escala, especialmente entre países distantes (Paiva, 2022).

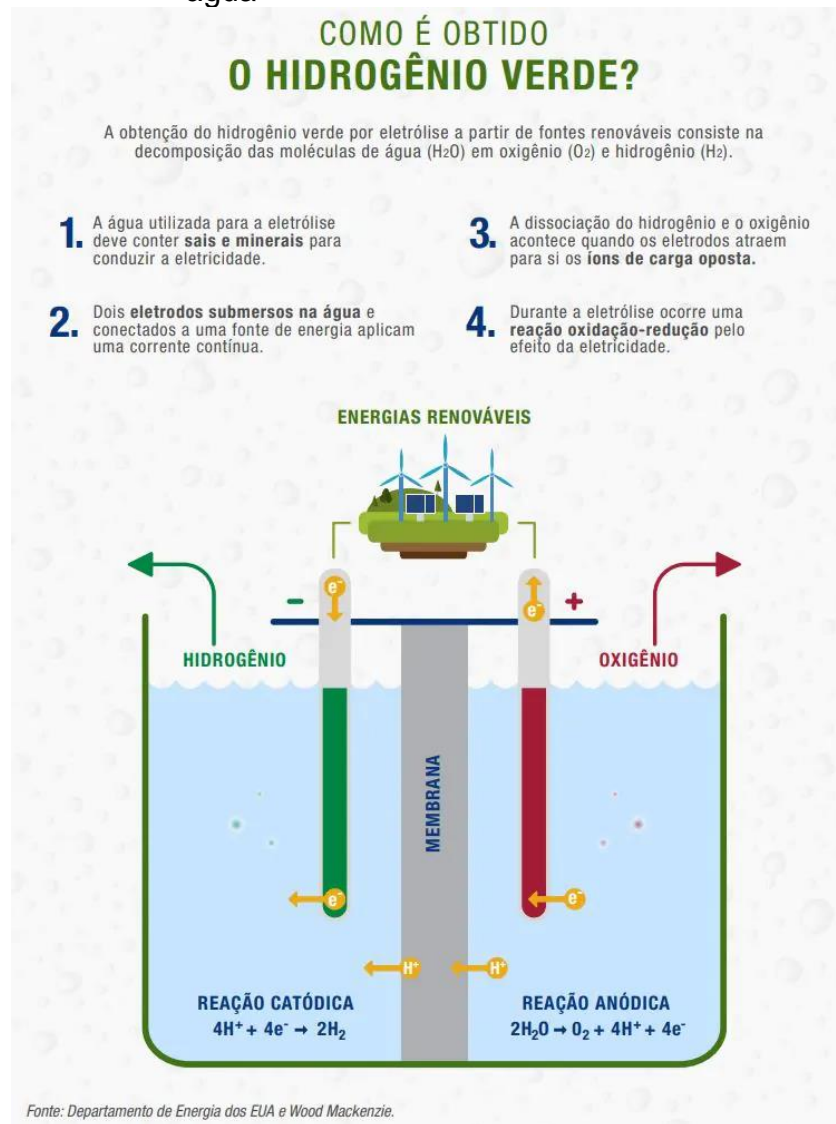
2.3 Classificação por cores e perspectivas de desenvolvimento

De acordo com a norma internacional ISO (*International Organization For Standardization*) 14687 o hidrogênio é categorizado por cores, as quais indicam a forma que o gás foi obtido. De acordo com Pilger (2022), o hidrogênio é categorizado por cores, as quais indicam a forma como o gás foi obtido. É relevante enfatizar que as classificações por cores podem diferir entre países. Além disso, embora existam várias maneiras de gerar, armazenar e utilizar o hidrogênio, a interseção entre impactos ambientais e considerações econômicas torna inviáveis certos tipos de hidrogênio.

O hidrogênio verde é produzido por meio de fontes renováveis, como energia solar e eólica, usando o processo de eletrólise da água, que libera oxigênio e hidrogênio. Essa forma de hidrogênio tem várias aplicações, podendo ser utilizado no transporte, na indústria química e na geração de eletricidade, mostrando-se promissor para o transporte de energia a longas distâncias, proveniente de fontes renováveis (De Lara; Richter; 2023).

O Brasil, por ter mais de 80% de sua geração elétrica proveniente de fontes renováveis, tem tudo para se tornar um país líder no mercado mundial de hidrogênio verde para fins de exportação. Além disso, pode estabelecer-se como fornecedor de produtos ambientalmente sustentáveis, como fertilizantes, aço, amônia, combustíveis, entre outros. Contudo, a introdução do hidrogênio verde na cadeia produtiva enfrenta desafios significativos, incluindo a necessidade de desenvolver um marco regulatório que garanta a segurança jurídica essencial para atrair investimentos estrangeiros para o Brasil (Martins, 2023).

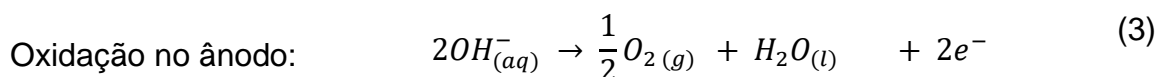
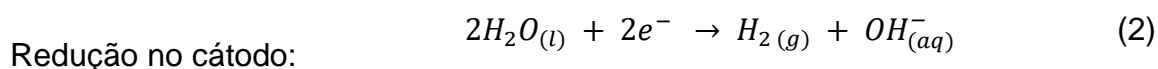
Figura 3 - Obtenção do hidrogênio verde por eletrólise da água



Fonte: O que é [...] (2023).

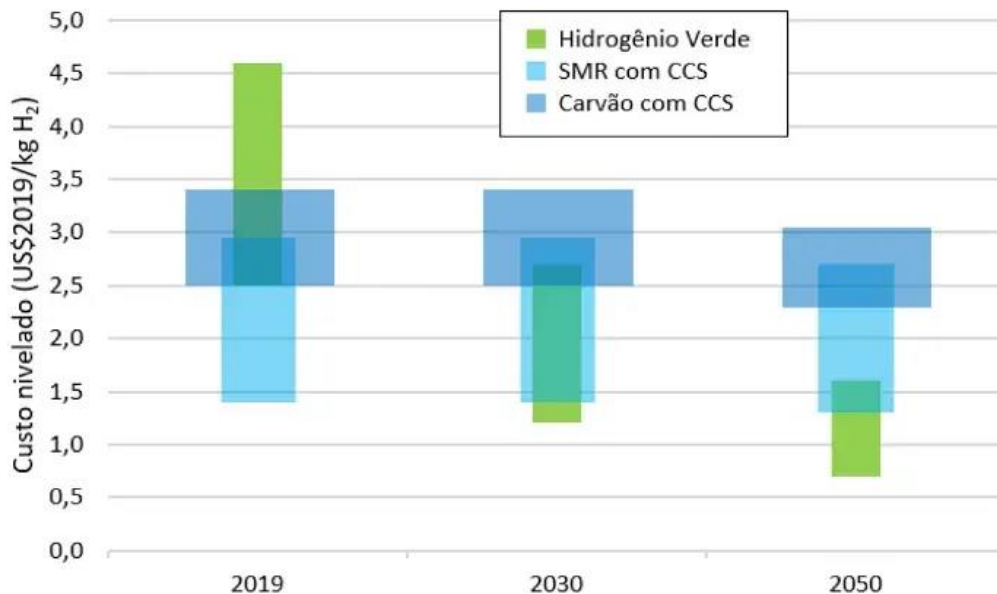
No relatório "The Future of Hydrogen", da International Energy Agency (IEA) o hidrogênio verde representa apenas 0,1% da produção total de hidrogênio, devido aos altos custos associados à sua fabricação. Contudo, tem-se investido visando diminuir seu custo e ampliar suas aplicações, impulsionado pela sua eficácia e pelos benefícios ambientais, com o objetivo de impulsionar a economia e acelerar a transição energética (ver Figura 2). De acordo com um estudo conduzido pela [referência não mencionada] em 2020, posteriormente citado pela Empresa de Pesquisas Energéticas (Empresa de Pesquisa Energética, 2022), os custos do hidrogênio verde devem diminuir em até 60% até 2030. Prevê-se que os preços do hidrogênio verde se equiparem aos do hidrogênio cinza entre 2028 e 2034, o que sublinha sua relevância e a necessidade de ações que o tornem mais competitivo. O infográfico mostrado na Figura 3 ilustra a obtenção de hidrogênio verde via eletrólise da água.

A eletrólise é a forma de obtenção de H₂V, sendo o método relacionado ao estudo deste trabalho. Esse processo ocorre com dois eletrodos, um carregado positivamente e outro carregado negativamente, ânodo e cátodo, respectivamente, são imersos no recipiente com água, quando o sistema é conectado a uma fonte de eletricidade, ocorrem duas reações, uma semi-reação de redução e uma semi-reação de oxidação. A água depositada no recipiente é formada pelos íons H⁺ (cátion) e OH⁻ (ânion). Os íons positivos são atraídos pelo eletrodo cátodo gerando hidrogênio (H₂) já os íons negativos são atraídos pelo eletrodo ânodo gerando oxigênio (O₂) e água (H₂O) (Knob, 2013; Gomes, 2022). Assim, a molécula da água passa por um processo de redução e oxidação de acordo com as reações (2) e (3) (Borges, 2022):



O hidrogênio verde, considerado o futuro na produção de energia, especialmente para a América Latina, conforme apontado pelo *Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit*, é gerado a partir de fontes renováveis, como eólica e solar, por meio do processo de eletrólise. Apesar de representar apenas 0,1% do total de hidrogênio produzido, devido aos custos elevados associados à sua produção, esforços estão sendo dedicados para reduzir esses custos e ampliar sua aplicação, impulsionados por sua eficácia e pelos benefícios ambientais que oferece (Empresa de Pesquisa Energética, 2021).

Figura 4 - Projeções de custo



Fonte: Empresa de Pesquisas Energéticas (2021, p. 14).

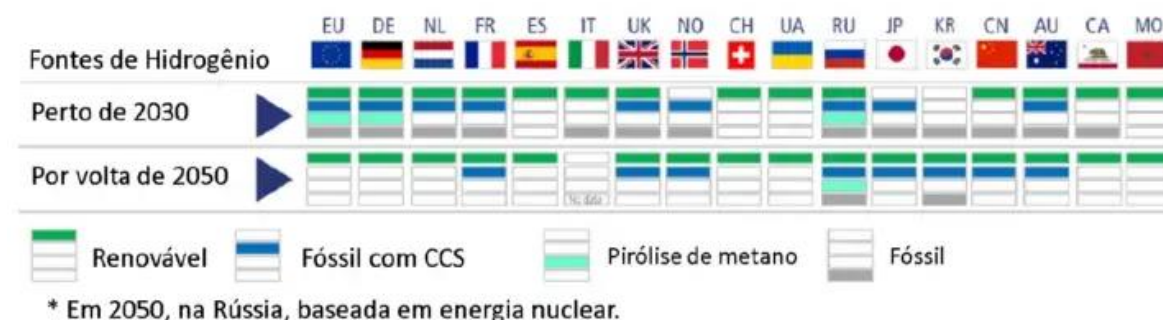
O relatório "The Future of Hydrogen" destaca que a diminuição prevista de 60% nos custos do hidrogênio verde até 2030, conforme indicado pelo estudo da, ressalta a importância desse combustível e a necessidade de medidas para torná-lo cada vez mais competitivo. A projeção de equiparação de preços entre os hidrogênios verde e cinza entre 2028 e 2034 válida sua relevância, destacando a importância de ações que visem não apenas mitigar as emissões de gases de efeito estufa, mas também impulsionar o desenvolvimento econômico e a geração de empregos, quando seu potencial for comparável ao dos hidrogênios azul e cinza (FIGURA 4) (Empresa de Pesquisa Energética, 2022).

O hidrogênio azul é derivado de hidrocarbonetos, principalmente o gás natural, por meio da reforma a vapor. Esse processo libera hidrogênio e dióxido de carbono (CO₂), sendo que o CO₂ é capturado e armazenado (De Lara; Richter, 2023). Esse carbono é categorizado como "de baixa emissão" ou "neutro" devido ao controle direto de suas emissões, evitando sua dispersão. Esse controle é alcançado por meio da técnica de captura e armazenamento de carbono (CSS), que segundo a IEA, é uma tecnologia promissora, capaz de neutralizar os gases de efeito estufa. O hidrogênio resultante desse processo, de acordo com a mesma fonte, pode ter seu preço final reduzido para os consumidores finais, contanto que haja o desenvolvimento e amadurecimento dos mercados globais relacionados à tecnologia de geração.

O hidrogênio marrom e o preto são obtidos a partir de carvão, é o completo oposto do hidrogênio verde pelos danos ambientais. O preto é produzido por carvão betuminoso; enquanto o marrom, por linhito. Por fim, o hidrogênio cinza, tipo mais comum. Derivado da reforma a vapor do gás natural (Pilger, 2022)

Segundo relatório publicado em 2022 pela EPE (Empresa de Pesquisa Energética, 2022), atualmente, os dutos de hidrogênio cinza percorrem 5 mil quilômetros, sendo que 90% se localizam em países europeus ou nos Estados Unidos — a produção dessa cor é mais viável em áreas com grande disponibilidade de gás natural, que corresponde, de acordo com a EPE, a 45% a 75% do custo da geração.

Figura 5 - Perspectiva de produção de hidrogênio cinza em diferentes países



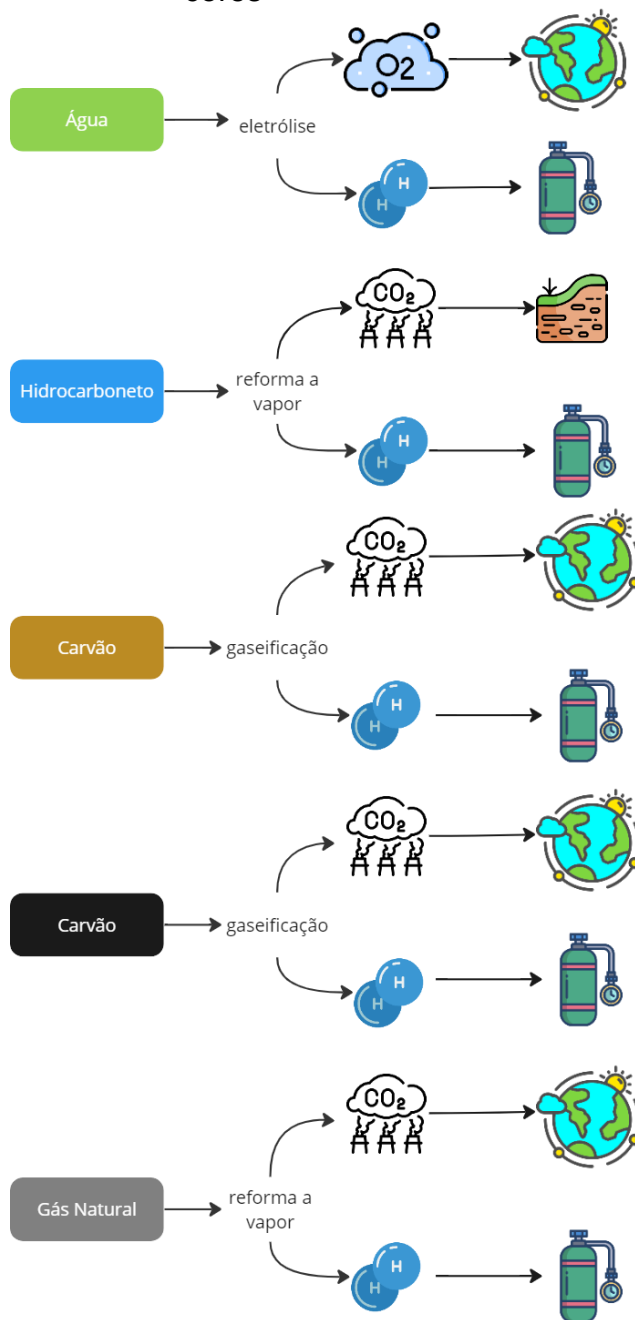
Fonte: Empresa de Pesquisa Energética (2022, p. 39).

O cenário geopolítico atual, marcado por tensões envolvendo a Rússia, está alterando os rumos do hidrogênio cinza. Com o compromisso de descarbonização, conforme a World Energy Council (2020), como ilustrado na Figura 5, vários países

têm a intenção de produzir hidrogênio cinza até 2030, impulsionados pela velocidade de produção, pela estabilidade tecnológica e pela abundância de gás natural. Somente a Rússia e a Coreia do Sul planejam manter o uso do hidrogênio cinza até 2050, evidenciando a disposição desses países em realizar a transição energética (Russ, 2020).

A figura seguir, a mostra a classificação do hidrogênio por cores conforme a seguindo a norma internacional. É relevante ressaltar a importância do hidrogênio verde na criação de rotas de exportação, mas, mais crucialmente, na viabilidade do armazenamento, transporte e subsequente utilização na geração de energia ao longo do tempo. Desse modo, o hidrogênio verde se torna uma ferramenta essencial na otimização das operações dos sistemas de transmissão de energia, proporcionando uma fonte confiável de energia próxima aos centros de carga por meio de combustíveis renováveis e não poluentes. Isso representa uma alternativa mais sustentável em comparação com a geração de energia elétrica proveniente de combustíveis fósseis (Russ, 2020).

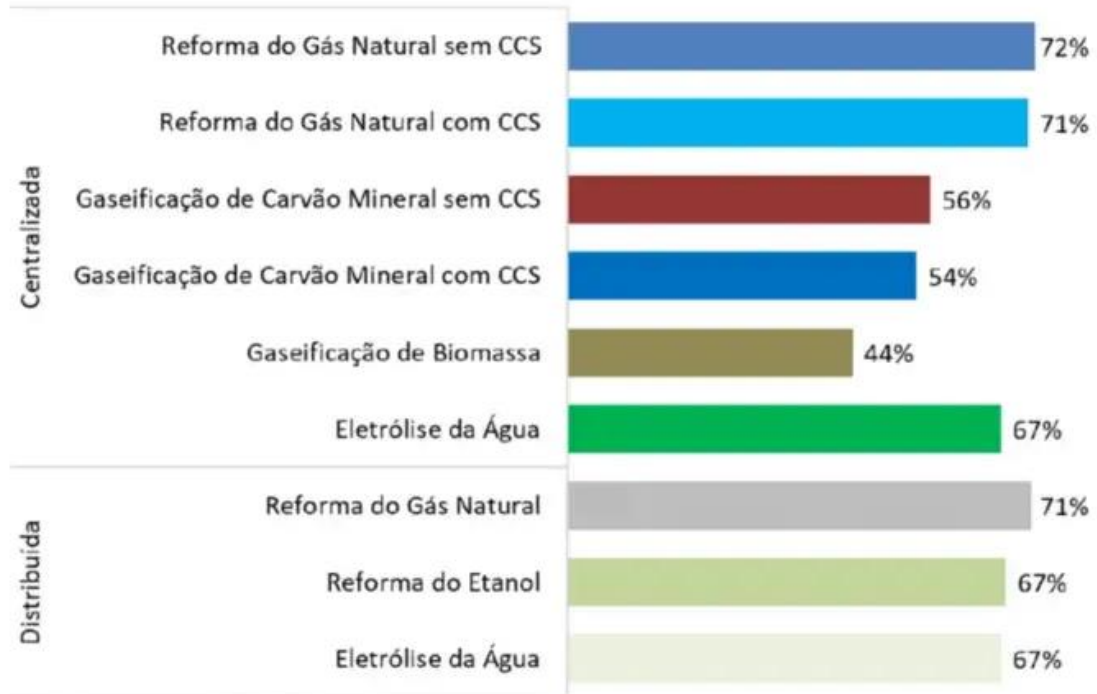
Figura 6 - Classificação do hidrogênio por cores



Fonte: Autora, 2023.

E na Figura 7, é mostrado um gráfico desenvolvido pela EPE com as cores de hidrogênio indicando a eficiência de cada processo de produção.

Figura 7 - Eficiências de conversão de acordo com o processo de produção de hidrogênio



Fonte: Pacific Northwest National Laboratory (2020b).

Segundo IEA, o emprego de cores para se referir às rotas de produção ou relacionar com termos como "hidrogênio sustentável", "de baixo carbono" ou "limpo" para descrever diversas vias de produção pode gerar confusão ao se considerar os níveis potenciais de emissões de cada rota. A Agência propõe então classificar conforme critérios fundamentados na avaliação da intensidade de emissões durante o ciclo de vida da produção de hidrogênio (Chiappini, 2023).

Na sua mais recente atualização, o Programa Nacional do Hidrogênio (PNH₂), lançado pelo governo brasileiro, adotou a expressão "hidrogênio de baixa emissão" para classificar hidrogênios provenientes de fontes renováveis, energia nuclear e fontes fósseis com tecnologias de captura de carbono. Enquanto que o programa dos Estados Unidos emprega o termo "hidrogênio limpo" e estipula uma meta de 4,0 kgCO₂/kgH₂ para as emissões de gases de efeito estufa ao longo do ciclo de vida relacionadas à produção de hidrogênio Na Alemanha adota-se a designação por cor, priorizando incentivos e subsídios para o hidrogênio de origem verde (Chiappini, 2023).

Com base nos aspectos apresentados, é crucial enfatizar o papel essencial do hidrogênio verde na transição energética criando novas rotas de exportação e, sobretudo, na viabilização do armazenamento, transporte e subsequente uso para a produção de energia ao longo do tempo.

2.4 O hidrogênio como vetor energético

Apesar de já ter sido usado como combustível em motores no século XIX, o hidrogênio ainda é pouco aplicado como fonte de energia. Somente a partir do início do século XX registrou-se o uso prático do hidrogênio no setor de transportes. Alguns exemplos são o uso em motores ou como preenchimento para balões e dirigíveis, caso do LZ de Ferdinand Von Zeppelin, pós Segunda Guerra Mundial. Com os avanços tecnológicos o hidrogênio passou a ser utilizado em maior escala no setor industrial (Moraes, 2022).

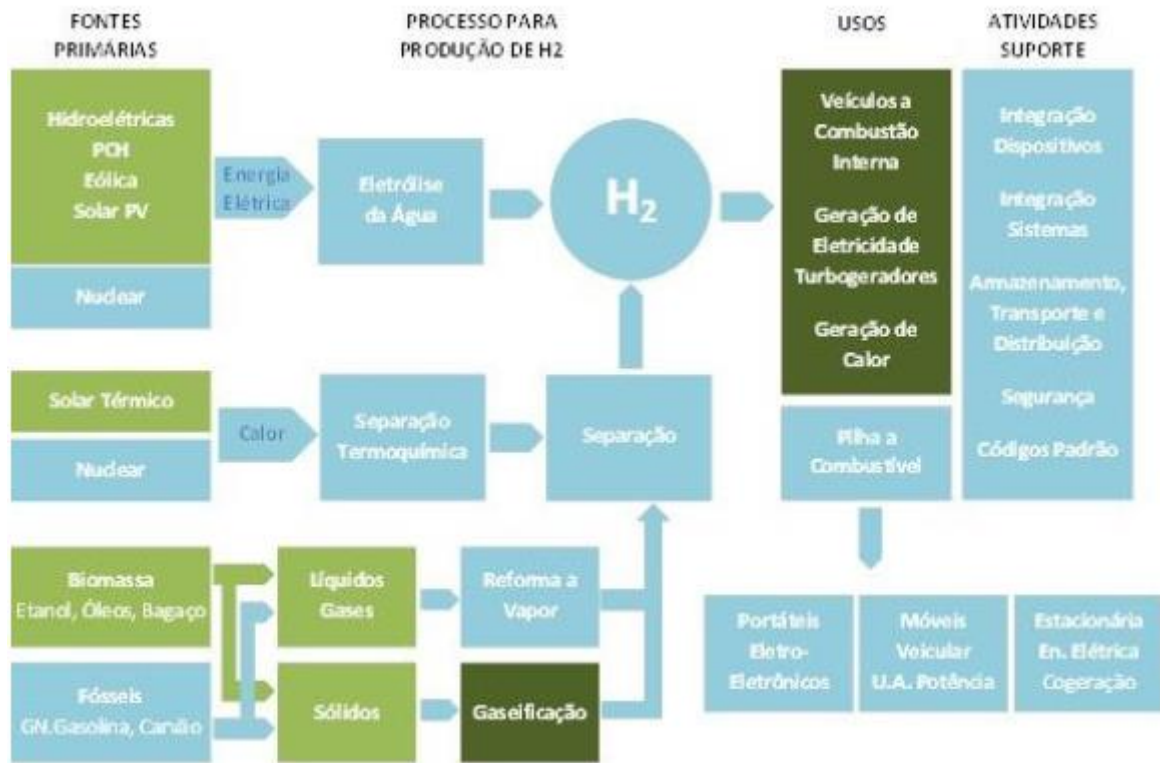
Quando o hidrogênio reage com oxigênio puro (O_2), forma-se água (H_2O) e há geração de calor. Quando queimado com ar, constituído por cerca de 68% de nitrogênio (N_2), alguns óxidos de nitrogênio (NO_x) são formados. Ainda assim, há menos produção de poluentes atmosféricos do que quando se queimam combustíveis fósseis (Moraes, 2022).

O hidrogênio, dada a sua versatilidade, encontra aplicações em diversos setores, desempenhando um papel crucial na refinaria de petróleo. Nesse contexto, é utilizado para a remoção de impurezas durante o processo de refino, contribuindo para a produção de combustíveis mais limpos. A sua presença é fundamental na produção de amônia, sendo um componente essencial na síntese desse composto. A amônia, por sua vez, desempenha um papel crucial na indústria de fertilizantes. A busca por práticas agrícolas mais sustentáveis impulsiona a produção de amônia verde, com o hidrogênio desempenhando um papel significativo (Santana; Gonçalves, 2022).

Além disso, o hidrogênio é empregado no transporte. Os veículos elétricos alimentados por células de combustível de hidrogênio têm ganhado destaque, apresentando-se como uma promissora visão para o futuro da mobilidade (Santana; Gonçalves, 2022). A implementação crescente dessa tecnologia reflete o compromisso de diversas indústrias e governos em reduzir as emissões de carbono

e impulsionar a transição para um sistema de geração limpa. A Figura 8 apresenta esses processos, de forma simplificada, desde sua produção até as aplicações do hidrogênio (Brasil, 2021a).

Figura 8 - Representação esquemática de rotas tecnológicas para obtenção e uso do hidrogênio



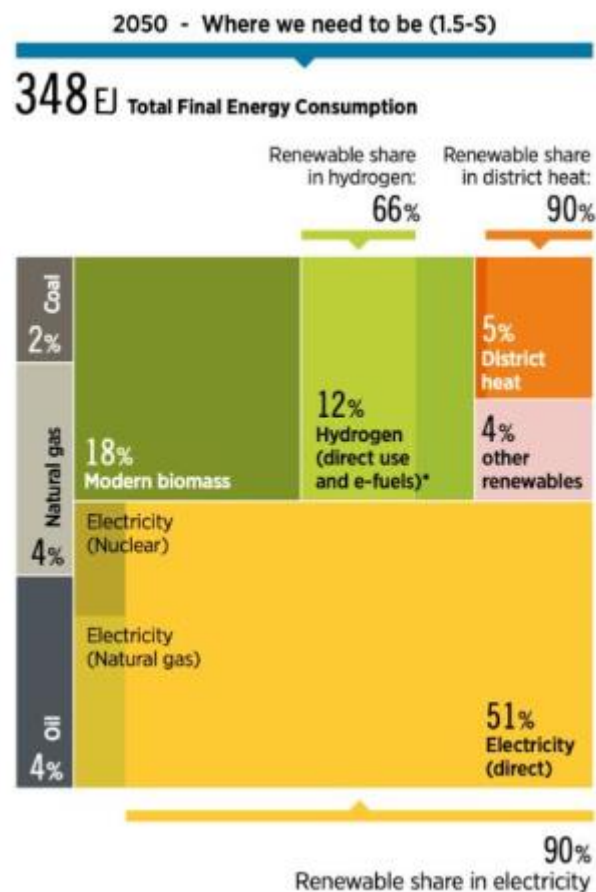
Fonte: Empresa de Pesquisa Energética (2022, p. 6).

Como se pode notar o hidrogênio emerge como protagonista em diversas áreas estratégicas, promovendo benefícios na área de produção de aço, ao substituir o coque pelo hidrogênio como agente redutor, há uma significativa redução nas emissões de gases de efeito estufa, transformando a indústria siderúrgica em uma aliada mais sustentável no combate às mudanças climáticas (Santana; Gonçalves, 2022). O hidrogênio, considerado um recurso praticamente infinito, apresenta alta densidade energética, tornando-se um vetor crucial para o armazenamento eficiente de energia. Sua versatilidade de usos, combinada com a característica de combustível sem carbono, o posiciona como peça-chave na transição energética global, sendo possível realizar mudanças sustentáveis em diferentes setores e impulsionando o caminho rumo a uma matriz energética mais

limpa e eficiente conforme preconiza o Objetivo do Desenvolvimento Sustentável 7 (ODS).

A IRENA (2019) (*apud* World Economic Forum, 2022) indica que o hidrogênio e seus derivados representarão 12% da energia final de consumo até 2050 (Figura 9), sendo 66% proveniente de energia renovável (hidrogênio verde ou H2V) e 33% advinda de combustível fóssil com captura de carbono (hidrogênio azul), como mostrado na figura abaixo.

Figura 9 - Estimativas de representatividade do Hidrogênio na matriz energética até 2050



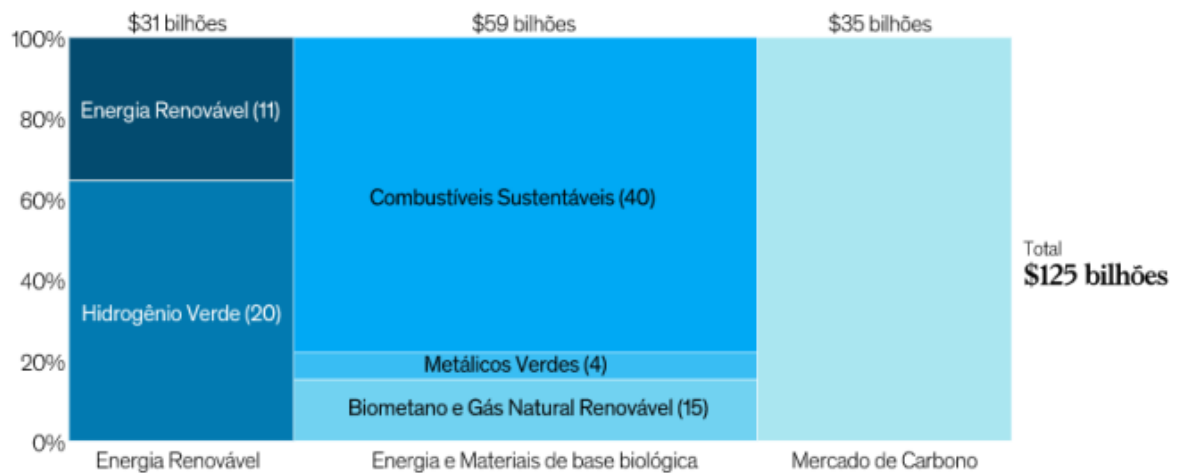
Fonte: World Economic Forum (2022).

Segundo um artigo da Sawaya *et al.* (2022), a descarbonização do Brasil é crucial para o bem-estar do planeta. Isso não só se deve ao fato de o país ser o sétimo maior emissor de gases de efeito estufa, mas também por sua capacidade única de se posicionar como uma das principais impulsionadoras da transição energética. O Brasil emite cerca de 2,2 gigatoneladas de dióxido de carbono

equivalente (GtCO₂eq) anualmente, com metade proveniente do desmatamento, um quarto da agricultura, um quinto dos setores de transporte e energia, e o restante da indústria e dos resíduos.

Ainda segundo a McKinsey (Sawaya *et al.*, 2022), o Brasil pode ser protagonista em três rotas de economia verde: energia renovável; energia e materiais de base biológica, e mercados de carbono. Juntas, essas rotas representam um mercado de mais de USD 125 bilhões, conforme mostra a Figura 10.

Figura 10 - Oportunidade associada à economia verde no Brasil até 2040



Fonte: Sawaya *et al.* (2022).

2.5 A economia do hidrogênio

De acordo com a publicação da IEA Global Hydrogen Review 2022, a demanda por hidrogênio é crescente. Segundo a publicação, em 2021, a demanda por hidrogênio foi de 94 milhões de toneladas (Mt). Essa demanda foi superior ao período pré-pandemia (2019) cuja demanda foi de 91 Mt. Isto representa cerca de 2,5% do consumo global de energia final. Mesmo que a maior parte do aumento provenha dos usos tradicionais na indústria e no refino, observou-se um crescimento na demanda por novas aplicações, que chegou a cerca de 40 mil toneladas, um aumento de 60% em relação a 2020 (White House, 2023).

Os 195 países signatários da conferência climática de Paris, 21ª Conferência das Partes (COP 21) de em dezembro de 2015, firmaram o primeiro acordo climático global para reduzir as emissões de gases de efeito estufa (GEE) a fim de mitigar as

mudanças climáticas e consolidar o desenvolvimento sustentável. Relatórios da IRENA indicam que as emissões de GEE associadas ao setor energético correspondem a aproximadamente dois terços das emissões globais. Dessa forma, a descarbonização da matriz energética tornou-se o vetor central do processo de transição energética (Castro *et al.*, 2023).

Tendo em vista a limitar o aquecimento global adotaram como estratégias: política energética e climática, como o Acordo de Paris onde, estabeleceu metas para limitar o aumento da temperatura global a menos de 2 graus Celsius acima dos níveis pré-industriais e os países assumiram o compromisso de reduzir as emissões de gases de efeito estufa, cada país delineou suas metas específicas e estratégias para enfrentar as mudanças climáticas (Liobikienė; Butkus, 2017). O acordo de Paris também estabeleceu uma revisão periódica, para que os países possam atualizar e aumentar as metas.

O Brasil comprometeu-se a diminuir suas emissões de gases de efeito estufa em 37% até 2025, em relação aos níveis registrados em 2005 (Organização das Nações Unidas, 2005) e reduzir até 2030 as emissões de gases de efeito estufa em 43% abaixo dos níveis de 2005. A Lei nº 13.576 de 2017 instituiu a Política Nacional de Biocombustíveis, chamada de *RenovaBio*, sendo parte integrante da Política Energética Nacional. Essa lei trouxe inovações importantes para o meio ambiente e apresentou como um de seus objetivos o cumprimento das obrigações estabelecidas no Acordo de Paris (Fares, 2019).

Na COP27 (27ª Conferência das Partes), realizada em novembro de 2022, definiram-se cinco temas e 25 ações colaborativas para entrega na COP28. Dentre os itens contemplados tem-se o hidrogênio de baixo carbono para acelerar a descarbonização para que a meta do Acordo de Paris de 2015 seja alcançada (Fundação Getúlio Vargas, 2023).

Na Europa, os desafios relacionados à redução do consumo energético nos países da União Europeia (UE-27) são evidentes. Estão entre as Metas de 20/20/20: reduzir emissões, o consumo energético e aumentar o uso de energia renovável e a eficiência energética. Observa-se uma implementação e crescimento expressivo das fontes de energia renovável na União Europeia, refletindo um compromisso com metas ambiciosas nesse setor (Liobikienė; Butkus, 2017).

Além disso, as tensões geopolíticas entre Rússia e Ucrânia têm motivado diversas nações a acelerar seus programas de transição energética, especialmente

os investimentos em hidrogênio renovável. A UE implementou o REPowerEU, um programa voltado para reduzir rapidamente a dependência dos combustíveis fósseis russos e acelerar a transição energética (Martins,2023)

No entanto, de acordo com Castro *et al.* (2023) somente o uso de fontes de energia renovável, como solar e eólica, para a geração de energia não é suficiente o bastante, considerando a intermitência e o balanço entre oferta e demanda. Nesse contexto, o H2V emerge como um vetor energético capaz de possibilitar a transição do modelo energético atual para uma matriz que explore plenamente o potencial das fontes de energia renovável.

Ainda em relação ao H2V, Delgado e Costa (2021), destacam que as vantagens competitivas do Brasil no desenvolvimento da indústria do H2V estão relacionadas a alguns fatores, tais como:

- a) Elevado potencial de fontes renováveis, como solar e eólica, superior a 1300 GW, segundo dados da EPE. De acordo com o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), o Brasil possui uma capacidade instalada total de 172 GW, dos quais 20 GW são provenientes de energia eólica e 4,5 GW de energia solar. Esses números destacam condições excepcionais em relação aos custos da energia elétrica, o que garante uma produção competitiva de H2V em comparação com outras regiões do mundo. Isso se deve ao fato de que a energia elétrica representa aproximadamente 70% dos custos de produção do H2V usando a tecnologia da eletrólise, que é a rota mais estabelecida;
- b) Um possível modelo regulatório e econômico brasileiro favorece a expansão das capacidades de geração de energia elétrica através de leilões destinados a novos investimentos no mercado cativo, garantindo uma competição contínua, e pelo aumento dos contratos diretos no mercado livre, consolidando a adoção consistente de energia renovável a preços competitivos. Isso é evidenciado pela presença e atuação no Brasil de grandes conglomerados econômicos globais (como Engie, EDP, Enel, State Grid e Iberdrola) e empresas nacionais (como Energisa, Equatorial, Cemig, Copel e Celesc), que podem contribuir com suas visões estratégicas e robustez financeira para impulsionar o desenvolvimento da cadeia de valor na indústria do H2V;

- c) Os portos oceânicos no Brasil oferecem uma vantagem logística significativa para a exportação de H₂V para outros países. Recentemente, o Observatório do Hidrogênio do Gesel, em sua publicação de janeiro de 2022 (Castro *et al.*, 2022), divulgou Memorandos de Entendimento que propõem investimentos substanciais no avanço da economia do hidrogênio no país. A maior parte desses investimentos está direcionada para o desenvolvimento no Porto de Pecém, no Ceará, no Polo Industrial de Camaçari, na Bahia, no Porto do Açu (RJ), no Porto Suape (PE) e também no estado do Rio Grande do Norte.

Dessa forma, ainda de acordo com Delgado e Costa (2021), fica evidente que, em um cenário de transição energética e vasta oferta de fontes renováveis no Brasil, a eficaz implementação da produção de hidrogênio verde necessita do apoio adequado de instituições governamentais para avançar.

Entretanto, ao contrário de outros países, o Brasil ainda não estabeleceu até o momento uma estratégia específica abrangendo a regulação, produção, consumo, transporte, armazenamento e mesmo a exportação do hidrogênio, a fim de integrá-lo devidamente no planejamento e na matriz energética nacional. Portanto, reitera-se a necessidade dos esforços regulatórios e de financiamento por parte do governo, os quais são essenciais para impulsionar o desenvolvimento do mercado de hidrogênio. Nesse sentido, dada a relevância do tema no contexto da descarbonização da matriz energética brasileira, surge uma questão relevante, foco analítico deste trabalho.

2.6 Experiências Internacionais

No documento elaborado pela Fundação Getúlio Vargas (FGV): "Panorama Internacional sobre o Hidrogênio Verde", pelo menos 25 países se comprometeram a investir cerca de US\$73 bilhões em hidrogênio verde no último ano. Aproximadamente 14% desses fundos serão provenientes de setores públicos e privados da Alemanha. O custo atual do "hidrogênio fóssil" é cerca de US\$ 1,4 por quilograma produzido, enquanto o hidrogênio verde varia entre US\$ 5 e US\$ 7 por quilograma. No entanto, devido aos elevados preços do gás proveniente da Rússia, indústrias têm se voltado para fontes renováveis de energia a fim de produzir H₂V e alcançar as metas de *net zero emissions*. Na Europa, uma das estratégias para impulsionar o hidrogênio verde inclui a expectativa de substituir veículos movidos à

combustão por alternativas com combustíveis renováveis (Fundação Getúlio Vargas, 2023).

Conforme a IEA (International Energy Agency, 2022), de setembro de 2021 a julho de 2022, Áustria, Bélgica, China, Colômbia, Dinamarca, Luxemburgo, Polônia, Eslováquia e África do Sul adotaram estratégias nacionais para uso do hidrogênio. Antes disso, Austrália e Canadá já haviam adotado. O mapa mostrado na Figura 11, apresenta os países que adotaram estratégias para uso do hidrogênio desde 2021.

Figura 11 - Países que adotaram estratégias para uso do hidrogênio desde 2021



Fonte: International Energy Agency (2022, p. 183).

A União Europeia visa à tecnologia do hidrogênio como uma alternativa para diminuir as emissões de gases de efeito estufa que ocorrem nos setores industriais, de transporte e de energia. Demonstrando um compromisso rumo a uma economia totalmente integrada ao de hidrogênio, marcando uma fase inovadora na integração europeia.

De acordo com Apak *et al.* (2012), a Diretiva 2001/77 da UE, os estados membros deveriam se esforçar para que a parte das energias renováveis representasse mais de 12% no balanço energético geral e 22,1% no balanço elétrico do país, e o Pacote Integrado sobre Energia e Alterações Climáticas aprovado pelo Conselho da Primavera de Março de 2007 constitui o ponto de partida de uma Política Energética Europeia.

Na Alemanha, praticamente todos os regulamentos pertinentes ao hidrogênio e às células de combustível estão ou serão adaptados para atender à legislação

européia, incluindo diretivas e regulamentos. A parte essencial das normas utilizadas, atualmente e futuramente, será harmonizada com padrões internacionais, como os definidos pela ISO (*International Organization for Standardization*) e IEC (*International Electrotechnical Commission*), além das normas europeias (EN). Esse alinhamento regulatório visa garantir a conformidade e integração eficaz no contexto global das tecnologias de hidrogênio e células de combustível (Wurster, 2020).

Ainda de acordo com o artigo de Wurster (2020), a realização e implementação eficiente e econômica de tecnologias de hidrogênio e de células de combustível nos sistemas de energia e transporte existentes requerem regulamentos, códigos e processos apropriados — *Regulations, Codes and Standards — RCS*. Há alguns pontos que precisam ser enfrentados no quesito de regulamentação na Alemanha, por exemplo: Necessidade de mais envolvimento alemão em comitês internacionais, coordenação entre normas e regulamentos requer uma abordagem conjunta, necessidade de um plano estratégico para regulamentação do hidrogênio, identificação de obstáculos e ações para a regulação de hidrogênio, e revisão de diretrizes, desenvolvimento de padrões e maior envolvimento setorial.

No final de 2022, a Alemanha iniciou o primeiro leilão intitulado "H2Global" com o intuito de estabelecer contratos de 10 anos visando à importação de H2V na forma de amônia verde, a ser produzida fora dos países da União Europeia e da Associação Europeia de Livre Comércio — EFTA, na sigla em inglês. Em uma primeira fase, o H2Global avalia as qualificações técnicas e financeiras dos desenvolvedores e selecionará cinco consórcios para seguir no processo (+ TRANSIÇÃO ENERGÉTICA, 2023).

Em diversas partes do mundo, a China se destaca como o principal produtor global de hidrogênio, com uma produção anual de cerca de 33 milhões de toneladas, quase em sua totalidade de origem fóssil, entretanto possui um objetivo de produção anual de H2V de 100 mil a 200 mil toneladas até 2025, Chiappini (2023). A China está desenvolvendo fortemente ações e estratégias para aplicações de hidrogênio e células a combustível, com o objetivo de atingir uma participação de 10% do consumo doméstico de energia até 2040 (Newborough; Cooley, 2020).

Já a Austrália concentra seus esforços nos grandes centros de hidrogênio e na perspectiva duradoura de exportar grandes quantidades de hidrogênio renovável para outros países, conforme ressaltado pelo Coag *Energy Council* (2019) em 2019.

Países do norte da África (por exemplo, Argélia, Líbia, Tunísia, Marrocos, Egito) já reconheceram a perspectiva de produzir e exportar hidrogênio renovável em larga escala de hidrogênio renovável, conforme apontado por Fares, Djeddi e Nouioua (2019).

A utilização do hidrogênio desempenha um papel crucial na segurança energética dos países, permitindo a conversão eficiente entre eletricidade e hidrogênio e reduzindo a dependência de recursos específicos. A economia do hidrogênio representa uma visão inovadora para o futuro, centrada na adoção do hidrogênio como fonte energética. De acordo com o Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA), a demanda global por hidrogênio triplicou desde 1975 e continua a crescer, sendo majoritariamente suprida por combustíveis fósseis, com 6% do gás natural global e 2% do carvão global destinados à produção de hidrogênio.

Em 2021, o mercado global de geração de hidrogênio atingiu a marca de US\$ 117 bilhões, conforme reportado por Machado (2021). O Conselho Empresarial Mundial para o Desenvolvimento Sustentável (WBCSD) e a Iniciativa de Mercados Sustentáveis (SMI) uniram forças para impulsionar o crescimento na demanda e no fornecimento de hidrogênio, congregando empresas de diversos setores. Vinte e oito empresas, representando desde a mineração até serviços financeiros, fizeram promessas em três categorias: demanda; fornecimento e suporte financeiro ou técnico, evidenciando o compromisso global em impulsionar a transição para o hidrogênio, conforme destacado por WBCSD e SMI (2021).

Já a demanda total de hidrogênio na América Latina pode ter um crescimento significativo até 2030, sendo o crescimento econômico o maior impulsionador da demanda de hidrogênio, enquanto as políticas ambientais têm um impacto limitado na demanda por novas aplicações (IEA, 2022). Notavelmente, o Brasil apresentou indicadores favoráveis, conforme demonstrado na Figura 12, onde se pode observar cada item que os países da América Latina estão se desenvolvendo.

Figura 12 - Potencial de hidrogênio na América Latina

Itens analisados em relação ao H ₂	Argentina	Brasil	Chile	Colômbia	Uruguai	Equador	Peru	Trindade e Tobago	Costa Rica	Paraguai
Marco regulatório	Não existe	Em progresso	Em progresso	Em progresso	Em progresso	Em progresso	Não existe	Em progresso	Em progresso	Em progresso
Mercado interno e demanda	Existe	Existe	Existe	Existe	Existe	Existe	Existe	Existe	Existe	Existe
Grandes centros industriais para uso de H ₂	Existe	Existe	Em progresso	Existe	Não existe	Em progresso	Em progresso	Em progresso	Em progresso	Em progresso
Infraestrutura para transporte	Não existe	Em progresso	Em progresso	Não existe	Em progresso	Não existe	Não existe	Não existe	Não existe	Não existe
Excesso de energia verde para usar na eletrólise	Não existe	Em progresso	Existe	Não existe	Existe	Em progresso	Não existe	Não existe	Existe	Existe
Grande indústria de petróleo e gás para apoiar o hidrogênio azul	Existe	Existe	Não existe	Existe	Não existe	Em progresso	Em progresso	Existe	Não existe	Não existe
Habilidades da força de trabalho	Em progresso	Em progresso	Não existe	Não existe	Não existe	Não existe	Não existe	Em progresso	Em progresso	Não existe
H ₂ azul ou cinza em produção	Existe	Existe	Existe	Em progresso	Existe	Não existe	Existe	Não existe	Não existe	Não existe
H ₂ verde em produção	Existe	Existe	Existe	Não existe	Em progresso	Não existe	Não existe	Não existe	Em progresso	Não existe
Apoio do governo	Em progresso	Existe	Existe	Em progresso	Existe	Em progresso	Em progresso	Existe	Existe	Existe

Fonte: Cavalcante (2022, p. 10)

3 METODOLOGIA

Este estudo trata-se de uma pesquisa aplicada. Para o desenvolvimento desta pesquisa foi adotado o método descritivo e exploratório, com abordagem qualitativa. Isso significa que a pesquisa parte de observações ou dados específicos para, em seguida, generalizar ou elaborar teorias mais amplas. Adota-se igualmente a abordagem monográfica, focalizando na análise do objeto de estudo específico, com alguns pontos particulares na contextualização histórica e na comparação com outros contextos similares. Este enfoque histórico e comparativo permite uma análise mais ampla e contextualizada das políticas em questão.

Por fim, é importante destacar que esta pesquisa se configura como predominantemente bibliográfica, baseando-se em fontes documentais disponíveis para a construção de conhecimento e fundamentação como artigos, monografias, teses, dissertações, documentos governamentais e livros que discutem sobre regulamentações do hidrogênio. O procedimento para a coleta do referencial teórico terá como ponto de partida o uso de bancos de dados digitais e de livre acesso.

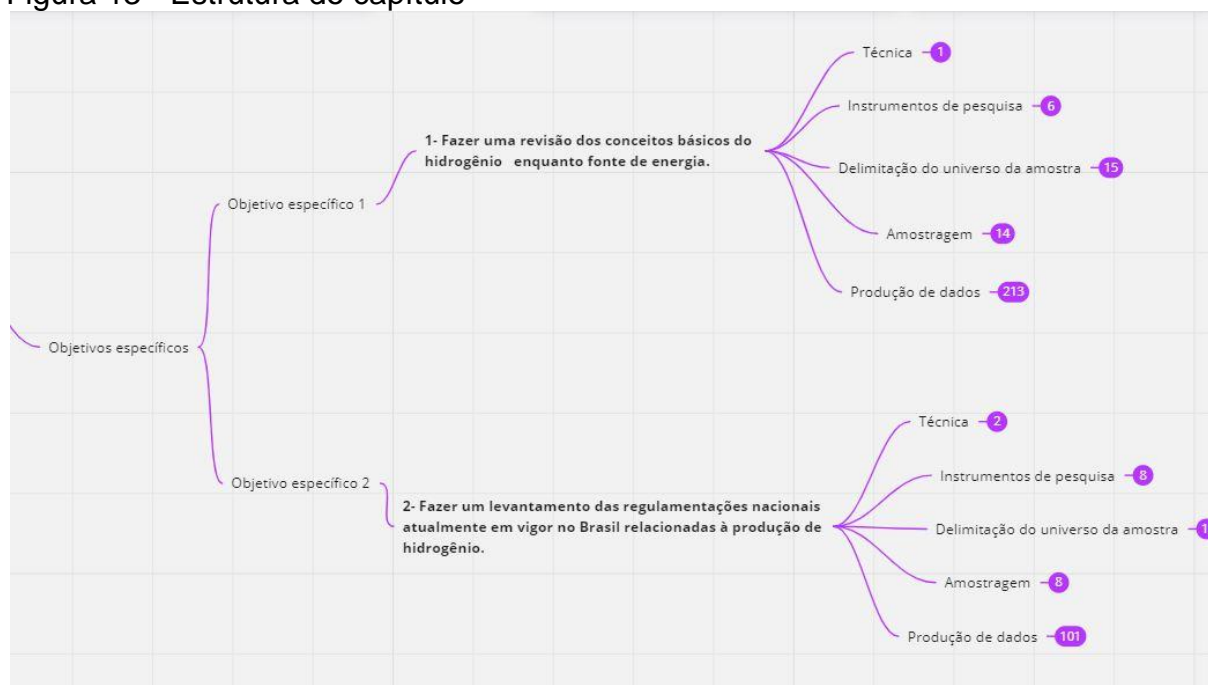
Essa metodologia permitiu identificar, selecionar e analisar cuidadosamente os principais trabalhos e publicações disponíveis sobre o tema. A revisão bibliográfica desempenhou um papel crucial para adquirir uma compreensão detalhada do conhecimento atual nesse campo, possibilitando a construção de uma base teórica sólida e fundamentada em evidências científicas confiáveis.

3.1 Levantamento das regulamentações nacionais em vigor no Brasil

Para realizar esta revisão, foram utilizados recursos dos portais do Governo, Senado Federal, Portal da Câmara dos Deputados, Congresso Nacional e Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). As publicações consultadas abordam, em comum, temas relacionados à legislação do hidrogênio e ao mapeamento das tecnologias de utilização do hidrogênio como fonte de energia no Brasil, compreendendo artigos, teses e leis publicados entre 2013 e 2023, podendo haver exceções, devido a ser uma literatura escassa sobre o assunto.

Também foram consultados documentos de instituições federais de natureza legislativa e artigos no âmbito acadêmico. A fim de restringir a quantidade de textos analisados, as publicações foram filtradas por meio da análise dos sumários, os quais deveriam indicar se o texto tratava de conceitos relacionados ao marco regulatório do hidrogênio e ao hidrogênio verde. Os pontos cruciais como histórico do hidrogênio no Brasil, Plano Nacional do Hidrogênio e panorama atual do hidrogênio verde no Brasil foram selecionados e organizados em um mapa conceitual, Figura 13, com o auxílio da ferramenta Miro (Realttimeboard, 2023).

Figura 13 - Estrutura do capítulo



Fonte: Autora (2023).

A partir da seleção inicial, foram identificadas as publicações, das quais foram extraídas informações sobre o antes da transição energética e esta, o PNH2 no que concerne os seus objetivos, princípios, pilares, diretrizes, as legislações atuais e a situação atual do mercado do hidrogênio no país, perpassando todos estes tópicos por uma análise das potencialidades e limitações. Ao final, estas potencialidades e limitações foram sintetizadas em um quadro configurando-se como uma síntese dos resultados encontrados.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Quadro 2 - Potencialidades e limitações dos projetos e normativa do Brasil

(continua)

Ação	Potencialidades	Limitações
Plano Nacional de Energia 2050 (PNE 2050) 1	Trazendo para o país a diversificação da Matriz Energética, com a participação de fontes renováveis e importação estratégica de energia.	Insegurança energética, variações climáticas, crescimento no consumo de eletricidade.
Resolução CNPE nº 2 1	Esta resolução traz investimento em pesquisa, desenvolvimento e inovação.	Restrições orçamentária.
Resolução CNPE nº 6 1	O comprometimento do governo brasileiro em fortalecer o mercado e a indústria do hidrogênio como vetor energético e a criação do Comitê Gestor do Programa Nacional do Hidrogênio (Coges-PNH 2), mostra segurança ao investidor	Desafios tecnológicos especialmente na produção, armazenamento e distribuição do hidrogênio, participação voluntária no comitê Assim, limitando o envolvimento de especialistas e profissionais qualificados .
Programa Nacional do Hidrogênio (PNH2) 1	Alavanca o incentivo a pesquisas e inovações relacionadas à produção, armazenamento, distribuição e aplicação do hidrogênio e incentiva cooperação internacional.	Custo de Implantação, desafios na produção, armazenamento e transporte eficientes e seguros do hidrogênio, aceitação do mercado e vulneráveis a mudanças políticas e administrativas.
PL 725/20222	Proposta de adição obrigatória de hidrogênio nos gasodutos de transporte visa integrar gradualmente este vetor energético à infraestrutura existente, estabelecendo percentuais mínimos obrigatórios em volume (5% a partir de 1º de janeiro de 2032 e 10% a partir de 1º de janeiro de 2050). Além disso, especifica a necessidade de incluir uma proporção mínima de hidrogênio sustentável. A legislação estabelece que o Estado tem o papel de regular, autorizar e fiscalizar a atividade da cadeia do hidrogênio, abrangendo a produção, importação, exportação, armazenagem, estocagem, padrões para uso e injeção nos pontos de entrega ou de saída.	Desafios na implementação, possíveis resistências setoriais setores tradicionais que dependem fortemente de combustíveis fósseis podem resistir à transição para o hidrogênio, monitoramento e fiscalização
PDE 20314	Projetos em portos estratégicos indicam uma visão de produção para exportação, a competitividade na produção de hidrogênio verde no Brasil devido a abundância de fontes renováveis, projetos de pesquisa e desenvolvimento, exploram diversas aplicações do hidrogênio, desde armazenamento de energia e uso em células a combustível até substituição de carvão na geração termelétrica.	Concorrência por recursos renováveis, desafios na Integração com o sistema elétrico, a produção de hidrogênio verde pode impactar a oferta centralizada de eletricidade, projetos em andamento impactarão o planejamento da transmissão, seja como carga ou geração.

Quadro 2 - Potencialidades e limitações dos projetos e normativa do Brasil
(continua)

Ação	Potencialidades	Limitações
Consulta Pública 147/20227	Mapeamento dos pólos industriais de hidrogênio visando a instalação de novos centros tecnológicos, mapeamento das competências exigidas pelo mercado de trabalho para atendimento dessas indústrias, previsão de uma certificação nacional do hidrogênio que atenda a parâmetros internacionais e mapeamento da demanda por hidrogênio das indústrias nacionais e posterior análise do potencial de expansão.	Necessidade de maior destaque para H2V, desafio na penetração do hidrogênio no mercado doméstico, custo de produção do hidrogênio.
PL 1878/20228	Regulação e fiscalização específica para o Hidrogênio Verde com a criação da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural, Biocombustíveis e Hidrogênio Verde (ANP), esclarece licenciamento específico e condições para empresas.	Prazos para Regulamentação (180 dias), restrições à participação baseada em histórico, desafio na Conciliação entre Setores na ANP, o sucesso da regulação e fiscalização do Hidrogênio Verde dependerá da eficiência e capacidade da ANP de adaptar suas operações e implementar as disposições da lei de maneira eficaz.

Fonte: Elaboração da autora baseada em Comissão de Meio Ambiente (2022), Prumo Logística Global (2022), Brasil (2022b), Prates (2022), Brasil (2021c), Brasil (2020).

A seguir, será exposto o panorama do hidrogênio no Brasil.

4.1 Histórico do desenvolvimento da tecnologia do H2V no Brasil

O Brasil apresenta potencial para se tornar líder no mercado de hidrogênio verde, pois apresenta condições singulares e para geração de energia limpa são um importante fator para que o país atinja essa posição. Cerca de 80% da matriz elétrica do Brasil é renovável, o que contribui fortemente para a geração do combustível, de acordo com a Empresa de Pesquisa Energética (Oliveira, 2022). O potencial de energia eólica e solar do Brasil está em torno de 1,3 milhão de megawatts (MW), tal potencial apresenta baixa possibilidade de ser absorvida pelos mercados internos latinoamericanos, possibilitando que a região se torne um grande hub global de exportação de renováveis (Rodrigues, 2022).

A implementação eficaz de regulamentos específicos é crucial para posicionar o país na dianteira da corrida global do hidrogênio, promovendo inovação e sustentabilidade. A seguir, apresenta-se uma cronologia das principais realizações nesse contexto.

Com o surgimento do Centro Nacional de Referência em Energia do Hidrogênio (CENEH), em 1998, o Brasil deu início a uma trajetória significativa no envolvimento com o hidrogênio como vetor energético (Santana; Gonçalves, 2022). 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 considerados 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 (Moraes, 2022).

O Brasil tornou-se membro do Programa Internacional de Parcerias para o Hidrogênio e Células de Combustível (IPHE) em 2003. Essa adesão sinalizou a intenção do país em participar ativamente de esforços globais para impulsionar o hidrogênio como fonte de energia (Linardi, 2011).

A partir do fomento de ações em pesquisa e desenvolvimento, bem como da criação de normas técnicas para a economia de hidrogênio. Um marco estratégico foi estabelecido em 2005 com a formulação do "Roteiro para a Estruturação da Economia do Hidrogênio no Brasil" do Ministério de Minas e Energia (MME). Este 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 (Lima, 2023).

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 (Lima, 2023). Em seguida, no ano de 2012, o MCTI promoveu um Workshop Internacional sobre Hidrogênio e Células de Combustível. Já em 2017, a fundação da Associação Brasileira de Hidrogênio (ABH2) surgiu como uma entidade representativa do setor, promovendo a integração entre instituições, empresas e governo (Santana; Gonçalves, 2022).

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 (Oliveira, 2022). Em 2020, o MME apresenta o Plano Nacional de Energia 2050 (PNE), documento que identifica o potencial de energias renováveis no Brasil que é superior a dezessete vezes à sua demanda em energia em 2050. Entre as tecnologias disruptivas, o destaque é para o hidrogênio, sendo seu principal desafio a elaboração de normatização para seu uso, transporte e armazenamento. O documento também traz recomendações para desenhar aprimoramentos regulatórios relacionados à qualidade, à segurança, à infraestrutura de transporte, ao armazenamento e ao abastecimento (Cavalcante, 2022).

O Conselho Nacional de Política Energética (CNPE) reforçou o compromisso do Brasil com o hidrogênio por meio das Resoluções CNPE Nº 6 e Nº 2 de 2021, delineando diretrizes e ações específicas para a implementação do Programa Nacional de Hidrogênio (PNH2). O PNH2 apresenta os principais pilares e os eixos temáticos para a área. As diretrizes do Programa Nacional de Hidrogênio, lançadas pelo MME, indicam os caminhos que a política nacional deve seguir, a próxima etapa será o lançamento da Estratégia Nacional do Hidrogênio, com o desdobramento das diretrizes (Oliveira, 2022). A Empresa de Pesquisa Energética (Brasil, 2021a), em 2021, publicou as "Bases para a Consolidação da Estratégia Brasileira do Hidrogênio", abordando o panorama do mercado, rotas tecnológicas, custos, desafios, o papel do hidrogênio na transição energética e, por fim, as implicações para políticas públicas. O MME também desenvolveu, no âmbito da Parceria Energética Brasil-Alemanha, o estudo "Mapeamento do Setor de Hidrogênio Brasileiro: Panorama Atual e Potenciais para o Hidrogênio Verde" (Santana; Gonçalves, 2022). A Figura 14, abaixo, apresenta as políticas públicas relevantes desenvolvidas até o momento, as quais têm impactos diretos e indiretos no progresso da tecnologia do hidrogênio no Brasil.

Figura 14 - Ações governamentais para o H2 no Brasil



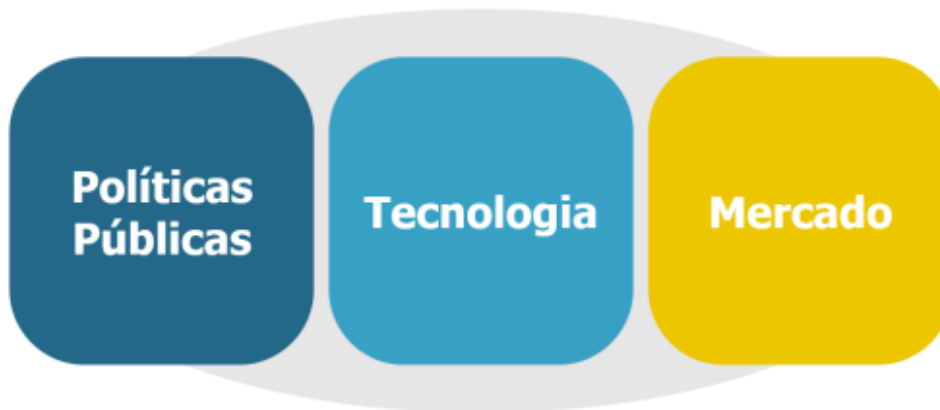
Fonte: Câmara de Comércio e Indústria Brasil-Alemanha (2021).

4.2 Plano Nacional do Hidrogênio - PNH2

O PNH2 tem o intuito é o de desenvolver e consolidar mercado de hidrogênio no Brasil, bem como promover a inserção internacional do País em bases economicamente competitivas". Dentre seus objetivos, são listados aqueles referentes ao "Arcabouço Legal e Regulatório- Normativo" (Chequer; Rage, 2021). A seguir são listados os seus objetivos de acordo com Brasil (2021a):

- I - O interesse em desenvolver e consolidar o mercado de hidrogênio no Brasil e a inserção internacional do País em bases economicamente competitivas;
- II - A inclusão do hidrogênio como um dos temas prioritários para investimentos em pesquisa, desenvolvimento e inovação, conforme Resolução CNPE nº 2, de 10 de fevereiro de 2021, aprovada pelo Conselho Nacional de Política Energética;
- III - A importância do hidrogênio como vetor energético que, combinado a outras soluções, têm potencial para contribuir globalmente para uma matriz energética de baixo carbono;
- IV - O interesse na cooperação internacional para o desenvolvimento tecnológico e de mercado para produção e uso energético do hidrogênio;
- V - A diversidade de fontes energéticas disponíveis no País para a produção de hidrogênio;
- VI - As tecnologias associadas a esse vetor energético já desenvolvidas e em desenvolvimento no País;
- VII - A diversidade de aplicações do hidrogênio na economia;
- VIII - O potencial de demanda interna e para exportação de hidrogênio no contexto de transição energética; e
- IX - A liderança do Brasil no tema "Transição Energética" no Diálogo de Alto Nível das Nações Unidas sobre Energia(Brasil, 2021a, p. 10).

Figura 15 - Representação dos pilares essenciais para o desenvolvimento da economia do hidrogênio



Fonte: Brasil (2021a, p. 12).

O PNH2 propõe a definir um conjunto de ações que facilite o desenvolvimento conjunto de três pilares fundamentais para o sucesso de uma trajetória de desenvolvimento da economia do hidrogênio: políticas públicas, tecnologia e mercado (Figura 15). São pilares interdependentes e que precisam evoluir de forma síncrona para que possam promover uma aceleração na obtenção dos resultados almejados (Brasil, 2021a).

O conjunto de diretrizes apresentadas ao Conselho Nacional de Política Energética (CNPE) prevê ainda a criação de um comitê técnico com seis eixos de atuação. Entre suas diretrizes, pode-se citar: aproveitar o gás natural nacional com captura e armazenagem o CO₂ para produção de hidrogênio azul, estimular a competitividade das energias renováveis para o H₂V e aproveitar as possibilidades trazidas pelos biocombustíveis, como etanol e biogás (Oliveira, 2022). A seguir, a Figura 16 dos eixos de acordo com Brasil (2021a).

Figura 16 - Eixos temáticos que compõem o PNH2



Fonte: Brasil (2021a, p. 13).

Mapear legislações e regulações nacionais existentes para subsidiar a inclusão do Hidrogênio, como vetor energético e combustível na matriz energética brasileira. Promover a regulação, por meio de agências governamentais, sobre produção, transporte, qualidade, armazenamento e uso do hidrogênio e suas tecnologias ao mapear as competências existentes das agências reguladoras, órgãos ou entidades competentes, bem como novas necessidades; avaliar a necessidade de proposição de normativos sobre novas tecnologias nos três níveis (federal, estadual e municipal). observar que a regulação se mantenha aberta às condições de mercado e evitando barreiras e trancamentos tecnológicos; avalia inter relações entre setores e propor harmonizações; buscar desenvolver e estabelecer códigos, normas e padrões expedidos pelas instituições nacionais em consonância com regras internacionais; promover a cooperação entre agências governamentais para a regulação do hidrogênio, considerando suas múltiplas fontes e utilizações, buscando a harmonização regulatória, citando-se como exemplo o transporte do hidrogênio misturado ao gás natural; avaliar a necessidade proposição de normas adicionais relativas à segurança, para produção, transporte e utilização do hidrogênio; e avaliar a necessidade de desenvolver mecanismos de certificação de hidrogênio, para produção e consumo (Chequer; Rage, 2021, p.2).

A regulação do setor é um ponto importante para estimular novos projetos. No caso do Brasil, além do recém-lançado Plano Nacional do Hidrogênio (PNH2), vários governos estaduais, como os do Ceará, do Rio Grande do Norte e de Minas Gerais estão costurando estratégias para atrair investimentos nessa área (Oliveira, 2022).

4.3 Arcabouço regulatório brasileiro

Os marcos regulatórios relacionados ao hidrogênio no Brasil, em 2022, são construídos por meio de um processo complexo e criterioso que envolve diferentes autores e etapas. Em muitos países, a responsabilidade pela elaboração de regulamentações pode recair sobre órgãos governamentais específicos, muitas vezes designados para regular setores específicos da economia. No contexto da energia, por exemplo, é comum que uma agência reguladora, como a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) no Brasil, tenha um papel central na criação de regulamentações para o setor energético, incluindo novas fontes como o hidrogênio.

Em 2022, já se tem dois marcos importantes que afetam o setor de hidrogênio. O primeiro é a publicação do Decreto nº 11.075, de 19 de maio de 2022, criando o mercado regulado de carbono no Brasil, com foco na exportação de créditos, especialmente para países e empresas que precisam compensar emissões para cumprir com seus compromissos de neutralidade de carbono. E o Projeto de Lei (PL) nº 725/2022, que inclui o hidrogênio como fonte energética na matriz brasileira e estabelece metas para a sua inserção nos gasodutos nacionais, sendo adicionado até 2032 o percentual mínimo de 5% de hidrogênio na rede de gasodutos, e 10% até 2050. Dentro desses percentuais, 60% deve ser hidrogênio sustentável de fontes energética: como solar, eólica, biomassas, biogás e hidráulica até 2032, com aumento de participação de 8% até 2050. O PL nº 725/2022 insere o hidrogênio na Lei nº 9.478/1997, a Lei do Petróleo, e o combustível passaria a ser regulado pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) (Oliveira, 2022).

O projeto de lei nº 1878/2022, cria a política que regula a produção e usos para fins energéticos do Hidrogênio Verde. De acordo com Artigo 1º, esta Lei dispõe sobre diretrizes visando à normatização da produção e usos para fins energéticos do Hidrogênio Verde, bem como sobre as atribuições institucionais associadas a essa fonte, no âmbito da Política Energética Nacional, com o objetivo de promover o desenvolvimento desse vetor energético.

O Projeto de Lei 2308/23 inclui o hidrogênio verde e o hidrogênio combustível na Política Energética Nacional. Com a medida, eles se tornam elementos da matriz

energética brasileira, o que possibilita o desenvolvimento de um mercado e de uma regulação própria (Câmara dos Deputados, 2023).

A regulamentação brasileira em relação ao hidrogênio verde em 2022 desempenhou um papel fundamental no cenário energético do país, fornecendo diretrizes claras e estabelecendo um quadro normativo para o desenvolvimento dessa fonte de energia sustentável (Oliveira, 2022). A Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), por exemplo, tem desempenhado um papel crucial na elaboração de normas para a produção, transporte, armazenamento e distribuição de hidrogênio verde. Isso proporciona uma base regulatória sólida, proporcionando segurança jurídica para investidores e empresas interessadas em participar do setor (Rangel; Silva; Paiva, 2008; Moraes, 2022).

Ainda conforme a regulamentação brasileira, em 2022, houve um entendimento da importância estratégica do hidrogênio verde no contexto da transição energética. A criação de incentivos fiscais e financeiros específicos para projetos relacionados ao hidrogênio verde é um exemplo disso. Esses incentivos têm o potencial de impulsionar significativamente os investimentos no setor, tornando-o mais atrativo para empresas e financiadores, e, assim, acelerando o desenvolvimento de tecnologias e infraestrutura necessárias (Oliveira, 2022).

Além disso, a regulamentação brasileira tem se mostrado atenta à necessidade de padrões de segurança rigorosos, dada a natureza inflamável do hidrogênio. A implementação de normas de segurança claras e alinhadas internacionalmente é essencial para mitigar riscos e garantir a aceitação pública dessa tecnologia emergente. O foco nas melhores práticas de segurança contribui para a construção de uma imagem confiável e segura do hidrogênio verde como parte integrante da matriz energética brasileira (Rangel; Silva; Paiva, 2008; Moraes, 2022).

O quadro a seguir mostra um histórico das ações, programas, estudos, publicações e proposições legislativas federais sobre a temática desde 1998 até 2023.

Quadro 3 - Ações governamentais de incentivo ao hidrogênio

(continua)

Ação	Objetivo	Entidade ou órgão responsável	Ano
Centro Nacional de Referência em Energia do Hidrogênio (CENEH) ¹	Estudar para aproveitamento energético do hidrogênio.	MCTI	1998
Programa Brasileiro de Células a Combustível (ProCaC) ¹	Organizar e promover ações P&D, por intermédio de projetos associados entre entidades de pesquisa e a iniciativa privada.	MCTI	2002
O Brasil tornou-se membro da Parceria Internacional para Hidrogênio e Células a Combustível na Economia – IPHE ¹	Transferência de informações governamentais, industriais e acadêmicas no assunto de células a combustível e o hidrogênio na sociedade.	MME (até 20217) MCTI (2018-atual)	2003
Reformulação do ProCaC, recebendo o nome de Programa de Ciência, Tecnologia e Inovação para a Economia do Hidrogênio” (ProH2) ¹	Incentivar ações capazes de impulsionar o desenvolvimento nacional da tecnologia de hidrogênio e de sistemas de célula a combustível.	MCTI	2005
Roteiro para a Estruturação da Economia do Hidrogênio no Brasil ¹	Destacar a importância das diferentes rotas tecnológicas nas quais o Brasil pudesse ter vantagens competitivas. ii) o papel do gás natural na transição até o predomínio do hidrogênio verde; e iii) a difusão nos mercados de geração distribuída, regiões isoladas e ônibus urbanos.	MME	2005
Hidrogênio energético no Brasil: Subsídios para políticas de competitividade: 2010-2025 ¹	Expor as recomendações para o incentivo à economia do hidrogênio.	CGEE	2010
Criação da Associação Brasileira do Hidrogênio (ABH2) ¹	Organizar melhor as ações e recursos (públicos e privados), o que tem gerado bons resultados com uma ação coordenada junto ao MCTI, MEC, MME, ANEEL, ANP e Eletrobrás, entre outros órgãos do governo federal.	Associados: empresas, pessoas jurídicas e comunidade científica	2017
Publicação do Plano de Ciência, Tecnologia e Inovação para Energias Renováveis e Biocombustíveis ¹	Enfatizar que uso de energias renováveis no Brasil representa uma oportunidade para a produção de hidrogênio por eletrólise quando houver excesso de oferta de energia elétrica de origem intermitente	MCTI	2018
Plano Nacional de Energia 2050 (PNE 2050) ¹	Apontar o hidrogênio como uma tecnologia disruptiva e como elemento de interesse no contexto da descarbonização da matriz energética.	EPE	2020

Quadro 3 - Ações governamentais de incentivo ao hidrogênio

(continuação)

Ação	Objetivo	Entidade ou órgão responsável	Ano
Bases para a Consolidação da Estratégia Brasileira do Hidrogênio ¹	Abordar o panorama do mercado, rotas tecnológicas, custos, desafios, papel do hidrogênio na transição energética e, por fim, implicações para políticas públicas.	EPE	2021
Resolução CNPE nº 2 ¹	Orientar a priorização da destinação de recursos de pesquisa, desenvolvimento e inovação regulados pela Agência Nacional de Energia Elétrica - Aneel e pela Agência Nacional de Petróleo Gás Natural e Biocombustível - ANP para o hidrogênio, entre outros temas relacionados ao setor de energia e à transição energética.	CNPE	2021
Resolução CNPE nº 6 ¹	Determinar a realização de estudo para proposição de diretrizes para o Programa Nacional do Hidrogênio (PNH2).		2021
Programa Nacional do Hidrogênio (PNH2) ¹	Propostas e diretrizes para uso do hidrogênio.	MME/MCTI/MDR/EPE	2021
Mapeamento do Setor de Hidrogênio Brasileiro: Panorama Atual e Potenciais para o Hidrogênio Verde ¹	Mostrar um panorama da indústria e de autores acadêmicos e institucionais atuantes no Brasil na área de hidrogênio, bem como uma visão geral sobre as principais tecnologias de aplicação de hidrogênio e Power-to-X, e seu estado de maturidade no Brasil em comparação aos países líderes nessas tecnologias.	MME, no âmbito da Parceria Energética Brasil Alemanha	2021
Cooperação bilateral "H2 Brasil" entre Alemanha e Brasil ¹	Cooperação internacional para estudos envolvendo o uso do hidrogênio.	MME	2021
PL 725/2022 ²	Disciplinar a inserção do hidrogênio como fonte de energia no Brasil e estabelecer parâmetros de incentivo ao uso do hidrogênio sustentável.	Senado Federal	2022
Decreto 21.200/2022 ³	Instituir o Plano Estadual para a Economia do Hidrogênio Verde – PLEH2V no Estado da Bahia.	Governo do Estado da Bahia	2022
PDE 2031 ⁴	Tratar sobre o mercado de hidrogênio e suas perspectivas.	MME	2022
Resolução CNPE nº 6 ⁵	Instituir o Programa Nacional do Hidrogênio, cria o Comitê Gestor do Hidrogênio e dá outras providências.	MME	2022
Primeira certificação brasileira de energia renovável ⁶	Fornecer para empreendimentos de geração de energia com níveis diferenciados de sustentabilidade, a chancela REC Brasil.	CCEE	2022
Consulta Pública 147/2022 ⁷	Colher contribuições sobre o Plano de trabalho trienal 2023-2025 do PNH2.	MME	2022

Quadro 3 - Ações governamentais de incentivo ao hidrogênio

(conclusão)

Ação	Objetivo	Entidade ou órgão responsável	Ano
PL 1878/2022 ⁸	Criar a política que regula a produção e usos para fins energéticos do Hidrogênio Verde.	Senado Federal	2022
PL 2308/2023 ⁹	Dispor sobre a definição legal de hidrogênio combustível e de hidrogênio verde.	Câmara dos deputados	2023
Criação da Comissão Especial de Debate de Políticas Públicas sobre o Hidrogênio Verde ¹⁰	Discutir e aprovar proposta de marco legal do hidrogênio de baixa emissão de carbono.	Senado Federal	2023
Instalação da Comissão Especial da Transição Energética e Produção do Hidrogênio Verde no Brasil ¹¹	Construir um relatório em conjunto com especialistas, ambientalistas, Executivo e sociedade civil para que o texto possa contemplar o meio ambiente, a sustentabilidade e a economia verde.	Câmara dos deputados	2023

Fonte: Elaboração da autora baseado em Brasil (2021b)¹, Prates (2022)²; Bahia (2022)³; Empresa de Pesquisa Energética [2022]⁴, Brasil (2022)⁵, Instituto Totum [S.d.]⁶, Ministério de Minas e Energia [S.d.]⁷, Comissão de Meio Ambiente (2022)⁸, Marques e Ventura (2023)⁹, Senado Federal [S.d.]¹⁰ e Câmara dos Deputados [S.d.]¹¹.

A criação de um arcabouço regulatório reflete o compromisso do Brasil em se posicionar como um ator relevante na transição global para energias mais limpas. Essa abordagem regulatória abrangente não apenas proporciona segurança jurídica, mas também sinaliza aos investidores e à comunidade internacional o comprometimento do país com a descarbonização de sua matriz energética.

4.4 Projetos nacionais em hidrogênio verde

No cenário brasileiro, projetos nacionais em hidrogênio verde representam uma resposta estratégica para atender às demandas crescentes por fontes de energia mais sustentáveis e contribuir para a transição para uma matriz energética mais limpa (Barroso; Rocha; Meireles Filho, 2022).

No contexto de cidades avançadas em hidrogênio, projetos estão sendo concebidos para integrar essa fonte de energia inovadora em sistemas urbanos. Essas iniciativas visam não apenas fornecer energia limpa para as cidades, mas também explorar aplicações avançadas do hidrogênio, como transporte, geração de energia elétrica e aquecimento residencial. O desenvolvimento desses projetos envolve a colaboração entre órgãos governamentais, empresas do setor energético

e pesquisadores, buscando criar soluções adaptadas às necessidades específicas das áreas urbanas (De Lara; Richter, 2023). No quadro seguinte, se encontram os principais projetos de hidrogênio verde no Brasil, conforme (Cavalcante, 2022).

Quadro 4 - Projetos e investimentos confirmados no Brasil de hidrogênio verde

Países que investe	Empresas	Valor previsto (US\$)	Local investido
Alemanha	White Martins	-	Porto do Pecém, Ceará
Alemanha	Linde	-	Porto do Pecém, Ceará
Alemanha	Hytron	-	Porto do Pecém, Ceará
Alemanha	Agência Alemã de Cooperação Internacional (GIZ, Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit)	39 milhões	Universidade Federal de Itajubá (Unifei), Minas Gerais
Alemanha	Siemens Energy	135,7 mil	-
Austrália	Fortescue Future Industries	6 bilhões	Porto do Pecém, Ceará
Austrália	Energix Energy	5,4 bilhões	Porto do Pecém, Ceará
Austrália	Fortescue	3,2 bilhões	Rio Grande do Norte
Brasil	Eneva	-	Porto do Pecém, Ceará
Brasil	Diferencial Energia	-	Porto do Pecém, Ceará
Brasil	H2helium Energia	-	Porto do Pecém, Ceará
Brasil	Abreu e Lima (RNEST)	-	Porto de Suape, Pernambuco
Brasil	Casa dos Ventos e Nexway	4 bilhões	Porto do Açu, Rio de Janeiro
Brasil	Cummins New Power	33 milhões	São Paulo
Brasil	Unipar	19,4 milhões	Santo André, São Paulo
Canadá	AmmPower	-	Espírito Santo
Espanha	Neoenergia	-	Porto do Pecém, Ceará
Espanha	Neoenergia	-	Porto de Suape, Pernambuco
França	Qair	6,95 bilhões	Porto do Pecém, Ceará
França	Engie	-	Porto do Pecém, Ceará
França	TotalEnergies	-	Porto do Pecém, Ceará
França	Qair	3,8 bilhões	Porto de Suape, Pernambuco
Holanda	Transhydrogen Alliance	2 bilhões	Porto do Pecém, Ceará
Portugal	EDP do Brasil	8 milhões	Porto do Pecém, Ceará
Reino Unido	Enterprize Energy	-	Porto de Suape, Pernambuco

Fonte: CAVALCANTE (2022, p. 12)

No âmbito do Brasil, a diversidade geográfica e climática oferece uma oportunidade única para explorar o potencial do hidrogênio verde em diferentes regiões do país. Projetos nacionais buscam aproveitar essas características, adaptando as tecnologias de produção de hidrogênio verde de acordo com as condições locais. Isso não apenas promove a autonomia energética, mas também estimula o desenvolvimento regional, criando oportunidades econômicas e empregos nas áreas envolvidas nos projetos (De Lara; Richter, 2023).

A implementação de cidades avançadas em hidrogênio não se limita apenas à produção, mas abrange a infraestrutura necessária para o transporte, armazenamento e distribuição do hidrogênio. A construção de uma rede integrada é crucial para garantir a viabilidade e eficácia desses projetos, envolvendo parcerias entre setores público e privado para investimentos em infraestrutura de ponta.

Os projetos nacionais em hidrogênio verde também buscam integrar as cidades avançadas nessas tecnologias, em uma visão mais ampla de sustentabilidade. Isso inclui a promoção de práticas urbanas inteligentes, eficientes e com baixa emissão de carbono. A implementação de tecnologias de hidrogênio verde pode ser um catalisador para o desenvolvimento de soluções inovadoras e a criação de ecossistemas urbanos mais resilientes e sustentáveis (Barroso; Rocha; Meireles Filho, 2022).

A conscientização e a educação pública desempenham um papel crucial nesse contexto. Projetos nacionais buscam não apenas implementar tecnologias de hidrogênio verde, mas também comunicar os benefícios e as oportunidades associadas a essas iniciativas para a população. Isso cria um ambiente propício para a aceitação e participação ativa da sociedade, fomentando uma cultura de sustentabilidade e inovação (De Lara; Richter, 2023).

A cooperação internacional também é um aspecto relevante desses projetos, visto que a troca de conhecimentos e melhores práticas contribui para acelerar o desenvolvimento de cidades avançadas em hidrogênio. Parcerias entre governos, empresas e instituições de pesquisa de diferentes países fortalecem a capacidade de inovação e promovem uma abordagem global para os desafios energéticos e ambientais (De Lara; Richter, 2023).

Em várias cidades ao redor do mundo, a adoção de projetos relacionados ao hidrogênio verde tem se tornado uma prioridade, marcando uma transição significativa em direção a fontes de energia mais sustentáveis. Copenhague, na Dinamarca, é uma notável pioneira nesse movimento, investindo em ônibus movidos a hidrogênio e integrando essa tecnologia em sua matriz energética. Da mesma forma, Aberdeen, no Reino Unido, está focada em reduzir suas emissões no setor de transporte, testando veículos movidos a hidrogênio para contribuir para a sustentabilidade urbana (Barroso; Rocha; Meireles Filho, 2022).

Amsterdã, na Holanda, tem sido outra cidade inovadora ao explorar o hidrogênio verde em suas frotas de transporte público e veículos de carga,

alinhando-se aos seus esforços contínuos para adotar tecnologias sustentáveis. Em Tóquio, Japão, uma das cidades mais populosas do mundo, a ênfase recai sobre a transição para uma economia de hidrogênio, visando reduzir as emissões e promover fontes de energia mais limpas.

Berlim, na Alemanha, destaca-se como um centro de inovação em projetos de hidrogênio verde, investindo em infraestrutura de transporte e produção de energia limpa. Nos Estados Unidos, Los Angeles tem demonstrado comprometimento com a descarbonização de sua infraestrutura, explorando a aplicação do hidrogênio verde em diferentes setores, desde o transporte público até a indústria.

Essas cidades representam apenas um conjunto inicial de exemplos, e é importante reconhecer que a transição para o hidrogênio verde está em constante evolução. Inúmeras outras cidades ao redor do mundo estão implementando projetos inovadores, demonstrando a crescente importância do hidrogênio verde como uma peça fundamental na busca por soluções energéticas mais sustentáveis e eficientes. O comprometimento global dessas localidades reflete uma compreensão compartilhada da necessidade de agir prontamente diante dos desafios ambientais e climáticos.

A potencial expansão da demanda total por hidrogênio na América Latina até 2030 é expressiva, sendo o crescimento econômico o principal catalisador desse aumento, enquanto as políticas ambientais desempenham um papel mais restrito na promoção de novas aplicações (IEA, 2022).

4.4.1 Perspectiva do hidrogênio no Rio Grande Do Sul

O Estado do Rio Grande do Sul, assim como outros estados brasileiros, está engajado em iniciativas para desenvolver regulamentações específicas relacionadas ao hidrogênio verde. O estado demonstrou um interesse crescente em aproveitar o potencial dessa fonte de energia sustentável para diversificar sua matriz energética e promover a transição para uma economia mais limpa e sustentável (Rangel; Silva; Paiva, 2008; Moraes, 2022).

O governo gaúcho tem participado ativamente do debate nacional sobre as diretrizes para o setor de hidrogênio verde. Isso inclui a colaboração com órgãos reguladores nacionais, como a ANP, para estabelecer normas específicas e alinhadas com as peculiaridades do estado. Essa abordagem colaborativa é

essencial para garantir que as regulamentações estejam sintonizadas com as necessidades locais e contribuam efetivamente para o desenvolvimento sustentável da região (Oliveira, 2022; De Lara; Richter, 2023).

O Rio Grande do Sul, devido à sua infraestrutura energética diversificada e ao potencial para aproveitar recursos renováveis, tem o cenário propício para se destacar no cenário nacional de produção e uso de hidrogênio verde. A regulamentação elaborada pelo estado busca criar um ambiente propício para atrair investimentos e promover o desenvolvimento de projetos relacionados ao hidrogênio verde (Oliveira, 2022; De Lara; Richter, 2023).

Ainda é importante considerar que o desenvolvimento dessas regulamentações está em constante evolução, sujeito a ajustes conforme o setor amadurece e novas tecnologias emergem. O Rio Grande do Sul, como outros estados, busca ser adaptativo e flexível em sua abordagem regulatória para incentivar a inovação e a eficiência no setor de hidrogênio verde.

Além das regulamentações específicas, é provável que o estado esteja considerando incentivos fiscais e financeiros para estimular o investimento em projetos de hidrogênio verde. Essas medidas têm o potencial não apenas de impulsionar a economia local, mas também de contribuir significativamente para a transição do estado para uma matriz energética mais sustentável.

O Rio Grande do Sul, com sua economia diversificada centrada em setores como agricultura, pecuária, indústria e serviços, se destaca como um ambiente propício para a exploração do hidrogênio verde em diversas aplicações. Investir em projetos relacionados ao hidrogênio verde não apenas pode impulsionar o crescimento econômico, gerar empregos e atrair investimentos, mas também capitalizar o potencial agroenergético do estado, utilizando resíduos agrícolas para a produção sustentável de hidrogênio (Oliveira, 2022; De Lara; Richter, 2023).

Além disso, o Rio Grande do Sul, reconhecido por seu potencial em energias renováveis, especialmente eólica e solar, pode integrar a geração de eletricidade dessas fontes ao processo de eletrólise para produção de hidrogênio verde, contribuindo para a redução das emissões de carbono. Sua localização geográfica estratégica e infraestrutura portuária oferecem oportunidades para um transporte eficiente de hidrogênio verde, com portos como o de Rio Grande atuando como centros logísticos para comércio e exportação (De Lara; Richter, 2023).

A presença de instituições de pesquisa e universidades reconhecidas proporciona um ambiente propício para a inovação, facilitando a colaboração entre setor privado, acadêmico e governo. A adoção do hidrogênio verde no estado não só oferece uma alternativa limpa para as indústrias locais, mas também promove um desenvolvimento regional mais sustentável, descentralizando a fonte de energia e reduzindo a dependência de fontes poluentes.

No contexto da pesquisa e desenvolvimento (P&D) do hidrogênio verde no estado do Rio Grande do Sul, Brasil, observou-se um crescente interesse e impulso, evidenciando a conscientização em ascensão sobre energias renováveis e a busca por soluções sustentáveis. Contudo, é crucial destacar que o panorama pode ter evoluído desde então, e informações mais recentes são aconselháveis para uma compreensão atualizada (Borges, 2022).

Figura 17 - Localidades favoráveis para cadeia de H₂V



Fonte: Rio Grande do Sul (2023, p. 3)

O Rio Grande do Sul (Figura 17) destaca-se pelo seu expressivo potencial em fontes renováveis, incluindo energia eólica e solar. A abundância desses recursos naturais posiciona o estado como um ambiente propício para o desenvolvimento de projetos relacionados ao hidrogênio verde. A pesquisa inicial concentrou-se em explorar essas fontes como base para a produção sustentável de hidrogênio, apontando para uma integração sinérgica entre os recursos renováveis e a geração de hidrogênio (Borges, 2022).

O estado do Rio Grande do Sul possui grande capacidade de exploração por conta da sua demanda, havendo uma grande quantidade de setores que podem se beneficiar do hidrogênio verde, o estado também possui uma logística de linha de transmissão e portos para escoamento, e possui viabilidade de produção e comercialização, conforme Sawaya *et al.* (2022). Em suma, o Estado oferece recursos naturais, infraestrutura e mercado. Na Figura 17, encontram-se dez locais favoráveis para a produção de H₂V.

O Rio Grande do Sul reúne diversas vantagens para a produção do H₂V, como a alta capacidade de produção de energia eólica e solar e a sua infraestrutura logística. Atualmente, 82% da matriz de energia elétrica é renovável, e a estrutura portuária é propícia para facilitar o escoamento da produção, devido à posição estratégica e privilegiada e à sinergia com diversas cadeias produtivas. Foi assinado um acordo de cooperação entre o governo e a prefeitura de Rio Grande, onde fica o porto que é o maior distrito industrial do Estado, para a elevação de ações que priorizem a transição energética e o plano de descarbonização (Dias,2023).

Paralelamente, tanto o estado quanto o país como um todo têm testemunhado um aumento significativo nas iniciativas de energia renovável. Projetos relacionados ao estabelecimento de parques eólicos e usinas solares estão emergindo para fornecer a infraestrutura necessária que sustenta a produção de hidrogênio verde. Essa convergência entre a produção de energia renovável e de hidrogênio sugere a criação de sinergias valiosas para o desenvolvimento sustentável (Borges, 2022).As universidades e instituições de pesquisa no Rio Grande do Sul estão ingressando ativamente em estudos e projetos relacionados ao hidrogênio verde, desempenhando um papel crucial no avanço da P&D. Suas pesquisas abrangem tecnologias de produção, armazenamento e aplicação do hidrogênio verde em diversos setores, contribuindo para a expansão do conhecimento e das capacidades locais (De Lara; Richter, 2023).

Além disso, a P&D do hidrogênio verde no estado começa a se integrar aos setores econômicos locais, como agricultura e indústria. A exploração das aplicações do hidrogênio verde em processos industriais e na produção agrícola é identificada como uma estratégia potencialmente benéfica para o desenvolvimento sustentável do Rio Grande do Sul. Esse alinhamento com setores-chave pode catalisar uma transição mais ampla e eficaz em direção a fontes de energia mais limpas e sustentáveis no estado.

A visão de veículos movidos a hidrogênio, postos de abastecimento de energia limpa substituindo postos de gasolina e indústrias alimentadas por fontes sustentáveis estão se tornando uma realidade no Rio Grande do Sul e em várias partes do Brasil e do mundo. Esse cenário inovador tem o potencial de revolucionar os setores energético, industrial e de transportes globalmente.

O Rio Grande do Sul, comprometido com o Acordo de Paris e as metas de redução de emissões, destinou R\$ 5 milhões para o Projeto Hidrogênio Verde, parte do programa “Avançar na Sustentabilidade”. Essa iniciativa visa não apenas motivos econômicos, mas também a compreensão da necessidade de minimizar os impactos das mudanças climáticas (De Lara; Richter, 2023). O estado declarou em fevereiro de 2023 que realizou um relatório junto com a empresa de consultoria McKinsey sobre o desenvolvimento econômico e potencialidade do setor no estado. O governo alega que até 2040, o combustível poderá proporcionar ao estado um avanço de R\$62 bilhões no PIB e 41 mil empregos (Dias, 2023).

Além de abordar preocupações ambientais, o desenvolvimento da cadeia de H2V no estado busca impulsionar a economia regional, gerar empregos e renda. Parcerias com empresas renomadas, como White Martins, Enerfín, Neoenergia e Ocean Winds, reforçam o compromisso do Rio Grande do Sul em liderar o caminho na produção de hidrogênio verde.

A consultoria da McKinsey & Company foi contratada para explorar a oportunidade H2V no Rio Grande do Sul, indicando a seriedade e o planejamento estratégico envolvidos nesse empreendimento. Com recursos naturais em abundância, infraestrutura portuária favorável e a visão de uma nova identidade produtiva, o estado está se posicionando para se destacar na transição para uma economia mais limpa e sustentável.

As políticas do Estado estão pautadas em uma agenda sustentável, assumindo o compromisso de reduzir as emissões de gases de efeito estufa em 50% até 2030 e de neutralizá-las até 2050. A McKinsey projeta que, em 2040, o uso de hidrogênio verde pode reduzir as emissões de CO2 no Rio Grande do Sul, em até 8,4 megatoneladas, com maior impacto no transporte rodoviário (Dias, 2023).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O hidrogênio verde surge como uma perspectiva promissora para moldar o futuro da matriz energética brasileira, fornecendo uma fonte de energia sustentável e de baixas emissões de carbono. O arcabouço regulatório brasileiro desempenha um papel primordial ao estabelecer diretrizes e normas para orientar o desenvolvimento dessa fonte de energia inovadora.

Conclui-se que o mercado de hidrogênio carece de uma regulamentação abrangente. Atualmente, não existe uma base normativa que discipline todas as atividades econômicas associadas a esse mercado. A ausência de segurança normativa, que definiria os agentes autorizados a produzir, as autorizações necessárias e as categorias de enquadramento para a comercialização, pode ser interpretada como um obstáculo para os investidores. Investir em um mercado desprovido de estrutura jurídica torna-se desafiador. A falta de regulação em todos os aspectos econômicos do mercado dificulta a efetiva implementação e funcionamento deste. Destaca-se que a Resolução nº 6 do CNPE, representa um primeiro passo para a concepção da estruturar o mercado. A Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) desempenha um papel central na elaboração de regulamentações específicas para a produção, transporte, armazenamento e distribuição de hidrogênio verde. A clareza e consistência dessas normas proporcionam um ambiente regulatório estável, essencial para atrair investimentos e impulsionar o crescimento do setor.

A busca por uma economia de baixo carbono é uma prioridade global, intensificada pelas drásticas mudanças climáticas que testemunhamos e experimentamos atualmente no planeta. Nesse contexto, o hidrogênio surge como uma alternativa essencial para facilitar essa transição. Nesse sentido, é importante a elaboração de um conjunto de normas e leis assim, evitando as incertezas jurídicas, por meio de normas e regulamentações adicionais desnecessárias. Essas medidas, se implementadas de maneira inadequada, podem desestimular ou até mesmo impedir o desenvolvimento do hidrogênio como fonte de energia.

Ao longo da pesquisa, foi possível identificar o considerável potencial do estado do Rio Grande do Sul para a produção de hidrogênio. A região se destaca pela disponibilidade territorial, abundância de recursos renováveis, como eólica, solar e hídrica, e um sistema de transporte consolidado para exportação. O estado já

conduziu um estudo de averiguação de disponibilidade de desenvolvimento da tecnologia na área, o qual evidenciou a viabilidade técnica da tecnologia do hidrogênio. Atualmente, o desafio enfrentado está relacionado à elaboração de normativas que possibilitem a implementação e de incentivos financeiros necessários para impulsionar esse setor no estado.

REFERÊNCIAS

- ABDIN, Z; ZAFARANLOO, A.; RAFIEE, A.; MÉRIDA, W.; LIPÍŃSKI, W.; KHALILPOUR, K. R. Hydrogen as na energy vector. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [S.l.], v. 120, n. 109620, local. 1-32, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032119308275>. Acesso em: 20 nov. 2023.
- APAK, SUDI; ATAY, ERHAN; TUNCER, GUNGOR. Renewable hydrogen regulations, codes and standards: Challenges faced by an EU candidate country. **International Journal Of Hydrogen Energy**, [S.l.]: Elsevier, v. 37, n.7, p.5481-5497 2012. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360319912000080>. Acesso em: 17 nov. 2023.
- BAHIA. **Decreto nº 21220, de 4 de março de 2022**. Declara de utilidade pública, para fins de desapropriação, as áreas de terra que indica. Salvador, BA: Governo do Estado da Bahia, 2022. Disponível em: <https://leisestaduais.com.br/ba/decreto-n-21220-2022-bahia-declara-de-utilidade-publica-para-fins-de-desapropriacao-as-areas-de-terra-que-indica>. Acesso em: 10 nov. 2023.
- BARROSO, A. M. R.; ROCHA, B. V. S.; ALVES, L. F. L.; MEIRELES FILHO, M.R.G. Obtenção do Hidrogênio Verde a partir de energias renováveis. **Revista Arte Ciência e Tecnologia**, Teresina, PI: Faculdade CET, local. 1-13. 2022. Disponível em: https://www.bnb.gov.br/s482-dspace/bitstream/123456789/1109/1/2021_CDS_212.pdf. Acesso em: 03 set. 2023.
- BEZERRA, F. D. **Hidrogênio verde**: nasce um gigante no setor de energia. 2021. Banco do Nordeste, ano 6., n. 212, p. 1-13. dez. 2021. Caderno Setorial. Disponível em: https://www.bnb.gov.br/s482-dspace/bitstream/123456789/1109/1/2021_CDS_212.pdf. Acesso em: 03 out. 2023.
- BORGES, A. C. F. **Hidrogênio verde**: alternativa para reduzir as emissões de gases de efeito estufa e contribuir com a transição energética. 2022. 66 p. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia de Energia) – Faculdade de Engenharia e Ciências, Universidade Estadual Paulista, Rosana, SP. 2022. Disponível em: https://www.bnb.gov.br/s482-dspace/bitstream/123456789/1109/1/2021_CDS_212.pdf. Acesso em: 12 out. 2023.
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Lei n. 13.576, de 26 de dezembro de 2017**. Dispõe sobre a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio) e dá outras providências. Brasília, DF: 2017. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2015-2018/2017/lei/l13576.htm. Acesso em: 03 dez. 2023.
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. **Plano Nacional de Energia 2050**. Brasília: MME: EPE, 2020. 230 p. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-227/topico-563/Relatorio%20Final%20do%20PNE%202050.pdf>. Acesso em: 01 out. 2023.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **PNH2**: Programa Nacional do Hidrogênio. Propostas e Diretrizes. Brasília, DF: 2021a. 24 local. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/mme-apresenta-ao-cnpe-proposta-de-diretrizes-para-o-programa-nacional-do-hidrogenio-pnh2/HidrognioRelatriodiretrizes.pdf>. Acesso em: 11 nov. 2023.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Despacho 5/BRASIL**. Exposição de Motivos, 11 de fevereiro de 2021. Resolução nº 02 de 10 fevereiro de 2021. Do Conselho Nacional de Política Energética – CNPE. Aprovo. Presidência da República. Despachante: Luiz Inácio Lula da Silva. Relator: Bento Albuquerque. 8 de março de 2021b. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/cnpe-aprova-resolucoes-sobre-governanca-do-programa-nacional-do-hidrogenio-e-exploracao-de-petroleo/resolucao2cnpe.pdf>. Acesso em: 02 out. 2023.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Nota técnica n. EPE-DEA-NT-003/2021**. Bases para a Consolidação da Estratégia Brasileira do Hidrogênio. Brasília: EPE, 23 fev. 2021. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-569/Hidroge%CC%82nio_23Fev2021NT%20%282%29.pdf. Acesso em: 16 out. 2023.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2031**. Brasília: MME:EPE, 2022a. v. 1. 411 p. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Documents/PDE%202031_RevisaoPosCP_rvFinal_v2.pdf. Acesso em: 08 nov. 2023.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Despacho 63/BRASIL**. Exposição de Motivos, 1º de julho de 2022. Resolução nº 6 de 23 de julho de 2022b. Do Conselho Nacional de Política Energética – CNPE. Aprovo. Presidência da República. Despachante: Luiz Inácio Lula da Silva. Relator: Adolfo Sachsida. 3 de agosto de 2022. Disponível em: https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/conselhos-e-comites/cnpe/resolucoes-do-cnpe/2022/res_cnpe-6-2022.pdf. Acesso em: 19 nov. 2023.

CÂMARA DE COMERCIO E INDÚSTRIA BRASIL-ALEMANHA. **Mapeamento do setor do hidrogênio panorama atual e potenciais do hidrogênio verde**. Rio de Janeiro: AHK, 2021. 113 p. Disponível em: https://www.energypartnership.com.br/fileadmin/user_upload/brazil/media_elements/Mapeamento_H2_-_Diagramado_-_V2h.pdf. Acesso em: 12 ago. 2023.

CÂMARA DOS DEPUTADOS. Transição energética e produção de hidrogênio verde. *In*: _____. **Portal da Câmara dos Deputados**. Brasília, DF: Câmara dos Deputados, [S.d.]. <https://www2.camara.leg.br/atividade-legislativa/comissoes/comissoes-temporarias/especiais/57a-legislatura/transicao-energetica-e-producao-de-hidrogenio-verde>. Acesso em: 06 nov. 2023.

CASTILLA, L. R. C. **A transição energética e as premissas do cenário RCP8.5**: o "business as usual" é menos drástico do que parece. 2020. 87 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Ambiental) – Programa de Pós-graduação em Ciência

Ambiental, Instituto de Energia e Meio Ambiente, Universidade de São Paulo, São Paulo. 2020. Disponível em:
https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/106/106132/tde-12022021-095019/publico/dissertacaoLCastilla_corrigena.pdf. Acesso em: 14 out. 2023.

CASTRO, N.; ELIZÁRIO, S.; BOTELHO, V.; CASTRO, B. **Observatório de Hidrogênio**. n. 5. Rio de Janeiro: GESEL, 2022. 31 p. Disponível em:
<https://gesel.ie.ufrj.br/wp-content/uploads/2022/03/observatorio-H2-05.pdf>. Acesso em: 13 nov. 2023.

CASTRO, N.; BRAGA, S. L.; PRADELLE, F.; CHAVES, A. C.; CHANTRE, C. **A economia do hidrogênio: transição, descarbonização e oportunidades para o Brasil**. Rio de Janeiro: E-papers, 2023. 336 p. Disponível em:
https://gesel.ie.ufrj.br/wp-content/uploads/2023/04/livro_economia_do_h2.pdf. Acesso em: 20 nov. 2023.

CAVALCANTE DE OLIVEIRA, ROSANA. **Texto para discussão: Panorama do hidrogênio no Brasil**. 2022. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. - Brasília: Rio de Janeiro. Disponível em:
https://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/11291/1/td_2787_web.pdf. Acesso em: 10 nov. 2023.

CHEQUER, A.; RAGE, P. O programa nacional do hidrogênio e a regulação (ou não) do hidrogênio no Brasil. **Ife**, Rio de Janeiro: Gesel, v. 18, n. 1. local. 1-5, 2021. Disponível em: <https://politica.estadao.com.br/blogs/fausto-macedo/o-programa-nacional-do-hidrogenio-e-a-regulacao-ou-nao-do-hidrogenio-no-brasil/> . Acesso em: 22 de set de 2023.

CHIAPPINI, G. Hidrogênio verde, azul, cinza: entenda o que cada cor significa e as perspectivas de desenvolvimento. *In*: AGÊNCIA EPBR. **EPBR**, [S.l.]: AGÊNCIA EPBR, 12 out. 2023. Disponível em: <https://epbr.com.br/hidrogenio-verde-azul-cinza-entenda-o-que-cada-cor-significa-e-as-perspectivas-de-desenvolvimento/>. Acesso em: 16 out. 2023.

CLICK PETRÓLEO E GÁS. Quais os perigos do hidrogênio? 2022. *In*: _____. **CPG**, [S.l.], 26 set. 2022. Disponível em:
<https://clickpetroleoegas.com.br/blog/hidrogenio/quais-os-perigos-do-hidrogenio/#:~:text=Armazenamento%20de%20hidrog%C3%AAnio%20pode%20causar%20riscos&text=Entretanto%2C%20por%20ser%20mais%20vol%C3%BAvel,riscos%20no%20armazenamento%20de%20hidrog%C3%AAnio>. Acesso em: 19 ago. 2023.

COAG ENERGY COUNCIL. **Australia's National Hydrogen Strategy**. Austrália: Coag Energy Council – Hydrogen Working Group, 2019. Disponível em:
<https://www.h2knowledgecentre.com/content/government622> .Acesso em: 19 ago. 2023.

COMISSÃO DE MEIO AMBIENTE. **Projeto de Lei nº 1878, de 2022**. Brasília, DF: Senado Federal, 2022. 17 p. Disponível em:
<https://www25.senado.leg.br/web/atividade/materias/-/materia/153923>. Acesso em: 09 nov. 2023.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA. **Hidrogênio Sustentável: Perspectivas e potencial para a indústria Brasileira**. Brasília: CNI, 2022. Disponível em: <https://static.poder360.com.br/2022/08/CNI-hidrogenio-verde-sustentavel-13ago2022.pdf>. Acesso em: 22 nov. 2023.

COPPOS, A. R. R. O papel da bioeletricidade no setor de transporte na transição energética brasileira. 2020. 93 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) —, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-graduação e Pesquisa em Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2020. Disponível em: https://www.pet.coppe.ufrj.br/images/documentos/teses/2020/Tese_inteira_Alice_2020.pdf. Acesso em: 19 ago. 2023.

DE LARA, D. M.; RICHTER, M. F. Hidrogênio verde: a fonte de energia do futuro. **Novos Cadernos NAEA**, [S.l.]: UFPA, v. 26, n. 1, p. 413-436, jan.-abr. 2023. Disponível em: <https://periodicos.ufpa.br/index.php/ncn/article/viewFile/12746/10175>. Acesso em: 02 ago. 2023.

DELGADO, F.; COSTA, A. M. Os caminhos do país na construção da economia global do hidrogênio. **Revista Conjuntura Econômica**, [S.l.]: FGV, v. 75, n. 3, p. 5, mar. 2021. Sem Tréguas. Disponível em: <https://periodicos.fgv.br/rce/issue/view/4654/2572>. Acesso em: 02 out. 2023.

DIAS, JULIA. Estado divulga estratégias para a produção de hidrogênio verde. *In*: PROCERGS CASA CIVIL. **Gov.rs**, 2023. Disponível em: <file:///C:/Users/pablolima/Downloads/H2%20RS.pdf>. Acesso em: 30 out. 2023.

E+ TRANSIÇÃO ENERGÉTICA. Hidrogênio verde na transição energética: desafios regulatórios. *In*: **Agência EPBR**, [S.l.], 21 jul. 2023. Disponível em: <https://epbr.com.br/hidrogenio-verde-na-transicao-energetica-desafios-regulatorios/>. Acesso em: 23 ago. 2023.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Bases para a Consolidação da Estratégia Brasileira do Hidrogênio 2021. *In*: _____. **Site Oficial EPE**, Ministério de Minas e Energia: Brasília, DF, [2021]. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-569/Hidroge%CC%82nio_23Fev2021NT%20%282%29.pdf. Acesso em 10 set. 2023

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Hidrogênio Cinza: Produção a partir da reforma a vapor do gás natural 2022. *In*: _____. **Site Oficial EPE**, Ministério de Minas e Energia: Brasília, DF, [2022]. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-654/NT%20Hidrog%C3%AAnio%20Cinza.pdf>. Acesso em 15 out. 2023

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Plano Decenal de Expansão de Energia 2031. *In*: _____. **Site Oficial EPE**, Ministério de Minas e Energia: Brasília, DF, [2022]. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/plano-decenal-de-expansao-de-energia-2031>. Acesso em: 10 nov. 2023.

ESTÊVÃO, T. E. R. **O hidrogênio como combustível**. 2008. 113 f. Dissertação (Mestrado integrado em Engenharia Mecânica) — Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto. 2008. Disponível em: <https://repositorio-aberto.up.pt/handle/10216/58102>. Acesso em 13 set. 2023.

FARES, T.; DJEDDI, A.; NOUIQUA, N. Solar energy in Algeria between exploitation policies and export potential. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SUSTAINABLE RENEWABLE ENERGY SYSTEMS AND APPLICATIONS*, 1., 2019, Algeria. **Proceedings [...]**.Algeria: IEEE, 2019. p. 1-5.

FERNANDES, G.; AYELLO, M.; AZEVEDO, J. H.; GONÇALVES, F. Panorama internacional dos desafios do hidrogênio verde. 2023. *In: FUNDAÇÃO GETÚLIO VARGAS. Site da FGV*, 27 jan. 2023. Disponível em: <https://portal.fgv.br/artigos/panorama-internacional-desafios-hidrogenio-verde>. Acesso em: 03 dez. 2023.

FUKUROZAKI, S. H. **Avaliação do ciclo de vida de potenciais rotas de produção de Hidrogênio**: Estudos dos Sistemas de Gaseificação da biomassa e de Energia Solar Fotovoltaica.2011. 180 f. Tese (Tecnologia Nuclear – Materiais) — Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, São Paulo. 2011. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/85/85134/tde-10102011-102047/publico/2011FukurozakiAvaliacao.pdf>. Acesso em 14 set. 2023.

GOMES, J. Eletrólise da água na obtenção de hidrogênio. **Revista de Ciência Elementar**, v. 10, n. 2, p. 1-7, 2022.

INSTITUTO TOTUM. Os RECs. *In: _____*. **Energia Renovável**. São Paulo: Instituto Totum, [S.d.]. Disponível em: <https://recbrazil.com.br/certificacoes.html>. Acesso em: 18 out. 2023.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Global Hydrogen Review 2022**. França: IEA, 2022. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2022>. Acesso em: 28 nov. 2023.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY. **Hydrogen**: a renewable energy perspective. Tóquio: IRENA, 2019. Disponível em: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Sep/IRENA_Hydrogen_2019.pdf. Acesso em: 03 out. 2023.

KNOB, D. **Geração de Hidrogênio por Eletrólise da Água Utilizando Energia Solar Fotovoltaica**. 2013. 125 p. Dissertação (Ciências na Área de Tecnologia Nuclear - Materiais) — Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, São Paulo. 2013. Disponível em: <http://repositorio.ipen.br/handle/123456789/23300>. Acesso em: 22 nov. 2023.

LAMEIRAS, F. L. **O hidrogênio como vetor de energia**. 2019. 90 f. Monografia (Diploma em Altos Estudos de Política e Estratégia) — Curso de Altos Estudos de Política e Estratégia (CAEPE), Escola Superior de Guerra, Rio de Janeiro, 2019.

LIMA, L. V. G. **Aspectos econômicos da cadeia de valor do hidrogênio**: potencialidades e externalidades. 2023. 124 f. Dissertação (Mestrado em Economia) — Escola Brasileira de Economia e Finanças, Fundação Getúlio Vargas, Rio de Janeiro. 2023. Disponível em: <https://repositorio.fgv.br/server/api/core/bitstreams/e1ca9989-05ca-4a59-8a4b-e7f848408044/content>. Acesso em: 02 out. 2023.

LINARDI, M. Hidrogênio e Células a Combustível. **ECEN - Economia & Energia**, São Paulo, ano 09, n. 66, p. 01-06, 8 mar. 2008.

LINARDI, M. Hidrogênio e células a combustível: Programa brasileiro de I&D. *In: MATERIALS FOR ENERGY WORKSHOP ADVANCES IN FUEL CELLS AND HYDROGEN*, 1., 2010, Torres Vedras, Portugal. **Ciência & Tecnologia dos Materiais**, v. 23, n. 1/2, p. 2-10, 2011. Disponível em: <http://repositorio.ipen.br/handle/123456789/4351>. Acesso em: 21 out. 2023.

LIOBIKIENE, G; MINDAUGAS, B. The European Union possibilities to achieve targets of Europe 2020 and Paris agreement climate policy. **Renewable Energy**, 2017, v. 106, n. C, p. 298-309. 2017. Disponível em: https://econpapers.repec.org/article/eeerenene/v_3a106_3ay_3a2017_3ai_3ac_3ap_3a298-309.htm. Acesso em: 24 ago. 2023

MACHADO, N. O Brasil vai entrar na corrida pela economia verde? *In: AGÊNCIA EPBR. EPBR*, [S.l.]: AGÊNCIA EPBR, 31 maio 2023. Disponível em: <https://epbr.com.br/o-brasil-vai-entrar-na-corrida-pela-economia-verde/>. Acesso em: 21 nov. 2023.

MARQUES, G.; VENTURA, A. **Projeto de Lei nº 2308, de 2023**. Brasília, DF: Senado Federal. 2023.3 p. Disponível em: <https://www.camara.leg.br/proposicoesWeb/fichadetramitacao?idProposicao=2359608>. Acesso em: 09 nov. 2023.

MARTINS, D. M. C. **A transição energética e o controle externo: O hidrogênio verde como vetor de descarbonização**. 2023. 177 f. Monografia de Especialização (Controle da Desestatização e da Regulação) — Instituto Serzedello Corrêa, Tribunal de Contas da União, Brasília, 2023. Disponível em: <https://portal.tcu.gov.br/biblioteca-digital/a-transicao-energetica-e-o-controle-externo-o-hidrogenio-verde-como-vetor-de-descarbonizacao.htm>. Acesso em: 27 out. 2023.

MINISTÉRIO DA FAZENDA. Fazenda vai apresentar plano para Brasil liderar corrida global na transição energética. *In: Ministério da Fazenda. GOV.BR*, Brasília, DF: MF, 19 maio 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/fazenda/pt-br/assuntos/noticias/2023/maio/fazenda-vai-apresentar-plano-para-brasil-liderar-corrida-global-na-transicao-energetica>. Acesso em: 02 dez. 2023.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Consulta Pública sobre o Plano de Trabalho Trienal do Programa Nacional do Hidrogênio (2023-2025). *In: _____*. **Portal do MME**. Brasília, DF: MME, [S.d.]. Disponível em: https://antigo.mme.gov.br/web/guest/busca-portal-mme?p_p_id=101&p_p_lifecycle=0&p_p_state=maximized&_101_struts_action=%2Fasset_publisher%2Fview_content&_101_redirect=%2Fweb%2Fguest%2Fbusca-portal-mme%3Fp_p_id%3D101%26p_p_lifecycle%3D0%26p_p_state%3Dmaximized%26_101_struts_action%3D%252Fasset_publisher%252Fview_content%26_101_assetEntryId%3D4074508%26_101_type%3Dcontent%26_101_groupId%3D36070%26_101_urlTitle%3Dmme-consulta-publica-147-de-14-de-dezembro-de-2022%26inheritRedirect%3Dtrue&_101_assetEntryId=3679252&_101_type=content&_101_groupId=36070&_101_urlTitle=consulta-publica-sobre-o-plano-de-trabalho-trienal-do-programa-nacional-do-hidrogenio-2023-2025-&redirect=%2Fweb%2Fguest%2Fbusca-portal-mme%3Fp_p_id%3D101%26p_p_lifecycle%3D0%26p_p_state%3Dmaximized%26_101_struts_action%3D%252Fasset_publisher%252Fview_content%26_101_assetEn

tryId%3D4074508%26_101_type%3Dcontent%26_101_groupId%3D36070%26_101_urlTitle%3Dmme-consulta-publica-147-de-14-de-dezembro-de-2022%26inheritRedirect%3Dtrue&inheritRedirect=true. Acesso em: 18 ago. 2023.

MORAES, L. L. **O cenário do hidrogênio verde**: uma revisão como suporte ao recente interesse surgido em indústrias e governos na região. 2022. 71f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) — Unidade Acadêmica do Cabo de Santo Agostinho, Universidade Federal Rural de Pernambuco, 2022. Disponível em: <https://repository.ufrpe.br/bitstream/123456789/4225/1/TCC%20-%20LUANNA%20LIMA%20DE%20MORAES.pdf>. Acesso em: 03 out. 2023.

NEWBOROUGH, M.; COOLEY, G. Developments in the global hydrogen market: electrolyser deployment rationale and renewable hydrogen strategies and policies. **Fuel Cells Bulletin**, [S. l.], v. 2020, n. 10, p. 16-22, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1464285920304867>. Acesso em: 19 nov. de 2023.

O QUE é o hidrogênio verde. *In*: COMPOSTCHÊIRA. **Compostchêira**, Clima e Meio Ambiente, [S. l.], 16 set. 2022. Disponível em: <https://compostcheira.eco.br/o-que-e-hidrogenio-verde/amp/> Acesso em: 13 out. 2023.

OLIVEIRA, R. C. **Panorama do hidrogênio no Brasil**. Rio de Janeiro:Brasília: Ipea, ago. 2022. Disponível em: <https://repositorio.ipea.gov.br/handle/11058/11291>. Acesso em: 29 nov. de 2023.

PAIVA, S. S. M. **Produção de hidrogênio verde ambientalmente sustentável**. 2022. 111 f. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) — Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN, 2022. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/47548>. Acesso em: 19 out. 2023.

PILGER, L. Um guia para as cores do hidrogênio. *In*: Ecotx. **ECOTX**, Curitiba, 22 dez. 2022. Disponível em: <https://www.ecotx.com.br/um-guia-para-as-cores-do-hidrogenio/>. Acesso em: 19 out. 2023.

PNNL - **The Pacific Northwest National Laboratory** (2020b). Hydrogen Production. (Planilha: Hydrogen Production Energy Conversion Efficiencies). The Hydrogen Analysis Resource Center (HyARC). Disponível em: <https://h2tools.org/hyarc/hydrogen-production>. Acesso em 30 de set de 2020.

PRATES, J. P. **Projeto de Lei nº 725, de 2022**. Brasília, DF: Senado Federal. 6 p. Disponível em: <https://www25.senado.leg.br/web/atividade/materias/-/materia/152413>. Acesso em: 10 nov. 2023.

PRUMO LOGÍSTICA GLOBAL. **Consulta Pública MME 147/2022**: contribuições ao Plano de Trabalho Trienal do Programa Nacional do Hidrogênio (2023-2025), que contém propostas de ações para fortalecimento das bases científico-tecnológicas; capacitação de recursos humanos; planejamento energético; arcabouço legal e regulatório-normativo; e abertura e crescimento do mercado e competitividade. Rio de Janeiro: PRUMO Logística Global, 2022, 3 p. Disponível em: https://antigo.mme.gov.br/c/document_library/get_file?uuid=cda3a824-6687-1df4-0d68-fab74f7b2b74&groupId=36070. Acesso em: 04 out. 2023.

RANGEL, C. M.; SILVA, R. A.; PAIVA, T. Pilhas de combustível e hidrogênio: Kit para fins didáticos. *In*: PROCEEDINGS INTERNATIONAL WORKSHOP ADVANCES IN FUEL CELLS AND THE HYDROGEN ECONOMY, Polo Tecnológico Lumiar, 15 fev. 2008. **Proceedings[...]**. Lisboa, Portugal, 2008, p. 51-52.

REALTIMEBOARD. **Miro**: RealtimeBoard, c2023. Site.

RIO GRANDE DO SUL. Secretaria do Meio Ambiente e Infraestrutura. **Hidrogênio verde**: um novo caminho para o Rio Grande do Sul. Porto Alegre: Governo do Estado do RS. 11p. Disponível em: <https://www.sema.rs.gov.br/upload/arquivos/202302/15225417-2-cartilha-imprensa-h2v-rs.pdf>. Acesso em: 03 set. 2023.

RODRIGUES, R. Brasil pode se tornar maior hub de exportação de hidrogênio verde do mundo. *In*: Globo. **Um Só Planeta**, [S.l.], 08 set. 2022. Disponível em: <https://umsoplaneta.globo.com/energia/noticia/2022/09/08/brasil-pode-se-tornar-maior-hub-de-exportacao-de-hidrogenio-verde-do-mundo.ghtml>. Acesso em: 03 out. 2023.

RUSS, D. Speaking for the ‘world power economy’: electricity, energo-materialist economics, and the World Energy Council (1924–78). **Journal of Global History**, v. 15, n. 2, p. 311-329, 2020.

SANTANA, F.; GONÇAVES, A. **Hidrogênio Verde**: Conceitos, Usos e Legislação no Brasil. Sergipe: Sergipectec. [S.d.]. 27 p.

SANTOS JUNIOR, A. C. F. **Análise da viabilidade econômica da produção de hidrogênio em usinas hidrelétricas**: estudo de caso em ITAIPU. 2004. 143 f. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção) — Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/87403>. Acesso em: 02 out. 2023.

SAWAYA, A.; FERREIRA, N.; FIORINI, R.; FANTONI, R.; GURLIT, W.; TAYAR, G.; GUILLAUMON, J.; DJANIAN, M.; PELLEGRINI, L.; AUDE, M.; CEOTTO, H.; COUPLAND, S.; COSTANTINI, X. Um tesouro escondido – a oportunidade para o Brasil se tornar líder na nova economia verde. *In*: _____. **Site da MCKINSEY & COMPANY**, [S.l.], 9 nov. 2022. Disponível em: <https://www.mckinsey.com.br/our-insights/all-insights/the-green-hidden-gem-brazilsopportunity-to-become-a-sustainability-powerhouse>. Acesso em: 26 nov. 2023.

SENADO FEDERAL. Comissão Especial para Debate de Políticas Públicas sobre Hidrogênio Verde. *In*: _____. **Portal do Senado Federal**. Brasília, DF: MME, [S.d.]. Disponível em: <https://legis.senado.leg.br/comissoes/comissao?codcol=2589>. Acesso em: 04 dez. 2023.

SILVA, J. R. R. **Hidrogênio verde: proposta de diretrizes para o desenvolvimento do mercado**. 2022. 105 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) — Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN, 2022. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/55084>. Acesso em: 01 ago. 2023.

SILVEIRA, A. S. **Método heurístico para otimização do dimensionamento de uma microrrede de energia**. 2021. 106 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria RS, 2021. Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/handle/1/22619>. Acesso em: 01 ago. 2023.

SOUZA, M. **Hidrogênio e células a combustível**. Rio de Janeiro: Synergia, 2018. 240 p.

WHITE HOUSE. **Building a clean energy economy: a guide book to the inflation reduction act's investments in clean energy and climate action**. 2 versão. Casa Branca: Washington, DC. 2023. Disponível em: <https://www.whitehouse.gov/wp-content/uploads/2022/12/Inflation-Reduction-Act-Guidebook.pdf>. Acesso em: 02 nov. 2023.

WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT; SUSTAINABLE MARKETS INITIATIVE. **H2Zero: Hydrogen pledges**. Geneva: WBCSD: SMI. nov. 2021. 11 p. Disponível em: <https://www.wbcd.org/contentwbc/download/13301/194616/1>. Acesso em: 20 nov. 2023.

WORLD ECONOMIC FORUM. Action on clean hydrogen is needed to deliver net-zero by 2050. Here's how. *In*: WORLD ECONOMIC FORUM. **Web Site do WEF**, Davos agenda, [Davos]: WEF, 23 maio 2022. Disponível em: <https://www.weforum.org/agenda/2022/05/action-clean-hydrogen-net-zero-2050/>. Acesso em: 02 nov. 2023.

WURSTER, R.; HOF, E. The german hydrogen regulation codes and standards roadmap. **International Journal of Energy Research**, v.45, n. 4, p. 4835-4840, dez. 2020. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/er.6249>. Acesso em: 24 ago. 2023.

APÊNDICE A - Desafios descarbonização regulatórios para uso do hidrogênio como vetor de do setor energético

DESAFIOS REGULATÓRIOS PARA USO DO HIDROGÊNIO COMO VETOR DE DESCARBONIZAÇÃO DO SETOR ENERGÉTICO

VIVIANNE ORTEGA DE LIMA; SABRINA NEVES DA SILVA

RESUMO

Este trabalho aborda o uso energético do hidrogênio como vetor de descarbonização. O hidrogênio pode ser obtido a partir de fontes como o gás natural e da água. Neste cenário, o hidrogênio verde (H2V) produzido a partir da água, por eletrólise, gerado a partir de fontes renováveis como energia eólica e solar. Isso tem impulsionado esforços em vários países para promover o desenvolvimento dessa tecnologia. O Brasil detém uma vantagem competitiva na produção de H2V em virtude do significativo potencial de energia eólica e solar. Assim, surgem espaços para a atração de investimentos. Além disso, o H2V pode ser utilizado para garantir a segurança dos sistemas energéticos e para cobrir o déficit de energia nos períodos de menor disponibilidade das energias renováveis intermitentes. No âmbito da transição energética, os países estão assumindo metas visando a redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE) para mitigar mudanças climáticas e firmar o desenvolvimento sustentável. Nesse viés, o H2V surge como vetor energético sustentável com potencial de substituir os combustíveis fósseis. Contudo, a integração do H2V na matriz energética enfrenta desafios, como a falta de um arcabouço regulatório, que garanta a segurança jurídica para atrair investimentos. Nesse sentido, o objetivo deste trabalho é analisar as regulamentações relacionadas à tecnologia do hidrogênio no Brasil e de seus desafios e oportunidades. Para isto, realizou-se um levantamento bibliográfico das normativas e projetos existentes e dos aspectos necessários à utilização deste vetor energético no contexto brasileiro. Observou-se que o mercado de hidrogênio carece de uma regulamentação abrangente. Atualmente, não existe uma base normativa que discipline todas as atividades econômicas associadas a esse mercado.

Com a luta contra as mudanças climáticas assumindo um papel crucial, a demanda por soluções que conduzam à descarbonização da economia está crescendo globalmente.

Palavras-chave: hidrogênio; transição energética; energias alternativas; descarbonização.

1 INTRODUÇÃO

A busca por fontes de energia limpa e renovável tornou-se crucial em um contexto global preocupado com as mudanças climáticas e a sustentabilidade ambiental. Nesse cenário, o hidrogênio aparece como uma promissora fonte de energia, oferecendo versatilidade, eficiência e emissões zero, em alguns casos. O aumento da demanda por hidrogênio como vetor energético requer uma

compreensão profunda das regulamentações que o orientam na geração de energia, proporcionando segurança aos investidores e influenciando as políticas globais (Lameiras, 2019). A integração bem-sucedida do hidrogênio no setor energético está intrinsecamente relacionada à criação de regulamentações sólidas que promovam sua produção, armazenamento e transporte de maneira segura e eficiente (Castro, 2023).

O conjunto de leis e normas específicas para regular o uso deste recurso como fonte de energia, apresenta uma deficiência crítica. Portanto, indaga-se que normativas estão sendo usadas para regular o uso do hidrogênio no país, sobretudo nos pontos mais críticos, que são o armazenamento e transporte (Martins, 2023).

No contexto da busca por energias limpas e renováveis, o hidrogênio emerge como uma promissora alternativa. Portanto, compreender e moldar a regulamentação do hidrogênio é essencial para garantir uma transição energética bem-sucedida e sustentável (Moraes, 2022).

A descrição da atual situação do H2V como fonte de energia no Brasil é central nesta pesquisa, com destaque para as normativas e regulamentações que direcionam seu uso. Isto possibilita uma compreensão mais precisa e profunda das políticas e regulamentações específicas que podem influenciar na consolidação e no desenvolvimento do hidrogênio como fonte de energia no Brasil.

Nesse sentido, o objetivo deste trabalho é analisar as regulamentações relacionadas à tecnologia do hidrogênio no Brasil e de seus desafios e oportunidades. Para isto, será feito um levantamento bibliográfico das normativas e projetos existentes e dos aspectos necessários à utilização deste vetor energético no contexto brasileiro.

2 METODOLOGIA

Foram consultadas publicações sobre o tema relacionadas à legislação do hidrogênio e ao mapeamento das tecnologias de utilização do hidrogênio como fonte de energia no Brasil. Dentre os documentos destacam-se àqueles de natureza legislativa e pesquisas acadêmicas. A fim de restringir a quantidade de textos analisados, as publicações foram filtradas por meio da análise dos sumários, os quais deveriam indicar se o texto tratava de conceitos relacionados ao marco regulatório do hidrogênio e ao hidrogênio verde. Ao final, os resultados foram sintetizados em uma tabela.

3 RESULTADOS

Os marcos regulatórios, relacionados ao hidrogênio no Brasil, em 2022, são construídos por meio de um processo complexo e criterioso que envolve diferentes etapas. Em muitos países, a responsabilidade pela elaboração de regulamentações pode recair sobre órgãos governamentais específicos, muitas vezes designados para regular setores específicos da economia. No contexto da energia, por exemplo, é comum que uma agência reguladora, como a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) no Brasil, tenha um papel central na criação de regulamentações para o setor energético, incluindo novas fontes como o hidrogênio.

A criação de um arcabouço regulatório reflete o compromisso do Brasil em se posicionar como um ator relevante na transição global para energias mais limpas. Essa abordagem regulatória abrangente não apenas proporciona segurança jurídica,

mas também sinaliza aos investidores e à comunidade internacional o comprometimento do país com a descarbonização de sua matriz energética.

A Tabela 1 mostra um histórico das ações, programas, estudos, publicações e proposições legislativas federais sobre a temática desde 1998 até 2023.

Tabela 1 – Ações sobre o uso do hidrogênio verde como vetor de descarbonização

Ação	Objetivo	Entidade ou órgão responsável	Ano
Centro Nacional de Referência em Energia do Hidrogênio (CENEH)	Estudar para aproveitamento energético do hidrogênio.	MCTI	1998
Programa Brasileiro de Células a Combustível (ProCaC)	Organizar e promover ações P&D, por intermédio de projetos associados entre entidades de pesquisa e a iniciativa privada.	MCTI	2002
O Brasil tornou-se membro da Parceria Internacional para Hidrogênio e Células a Combustível na Economia – IPHE	Trocar de informações governamentais, industriais e acadêmicas no assunto de células a combustível e o hidrogênio na sociedade.	MME (até 20217) MCTI (2018-atual)	2003
Reformulação do ProCaC, recebendo o nome de Programa de Ciência, Tecnologia e Inovação para a Economia do Hidrogênio” (ProH2)	Incentivar ações capazes de impulsionar o desenvolvimento nacional da tecnologia de hidrogênio e de sistemas de célula a combustível.	MCTI	2005

Roteiro para a Estruturação da Economia do Hidrogênio no Brasil	Destacar a importância das diferentes rotas tecnológicas nas quais o Brasil pudesse ter vantagens competitivas. ii) o papel do gás natural na transição até o predomínio do hidrogênio verde; e iii) a difusão nos mercados de geração distribuída, regiões isoladas e ônibus urbanos.	MME	2005
Hidrogênio energético no Brasil: Subsídios para políticas de competitividade: 2010-2025	Expor as recomendações para o incentivo à economia do hidrogênio.	CGEE	2010
Criação da Associação Brasileira do Hidrogênio (ABH2) 1	Organizar melhor as ações e recursos (públicos e privados), o que tem gerado bons resultados com uma ação coordenada junto ao MCTI, MEC, MME, ANEEL, ANP e Eletrobras, entre outros órgãos do Governo Federal.	Associados: empresas, pessoas jurídicas e comunidade científica	2017
Publicação do Plano de Ciência, Tecnologia e Inovação para Energias Renováveis e Biocombustíveis	Enfatizar que uso de energias renováveis no Brasil representa uma oportunidade para a produção de hidrogênio por eletrólise quando houver excesso de oferta de energia elétrica de origem intermitente.	MCTI	2018
Plano Nacional de Energia 2050 (PNE 2050)	Apontar o hidrogênio como uma tecnologia disruptiva e como elemento de interesse no contexto da descarbonização da matriz energética.	EPE	2020

Bases para a Consolidação da Estratégia Brasileira do Hidrogênio	Abordar o panorama do mercado, rotas tecnológicas, custos, desafios, papel do hidrogênio na transição energética e, por fim, implicações para políticas públicas.	EPE	2021
Resolução CNPE nº 2	Orientar a priorização da destinação de recursos de pesquisa, desenvolvimento e inovação regulados pela Agência Nacional de Energia Elétrica - Aneel e pela Agência Nacional de Petróleo Gás Natural e Biocombustível - ANP para o hidrogênio, entre outros temas relacionados ao setor de energia e à transição energética.	CNPE	2021
Resolução CNPE nº 6	Determinar a realização de estudo para proposição de diretrizes para o Programa Nacional do Hidrogênio (PNH2).		2021
Programa Nacional do Hidrogênio (PNH2)	Propostas e diretrizes para uso do hidrogênio.	MME/MCTI/MDR/EPE	2021

Mapeamento do Setor de Hidrogênio Brasileiro: Panorama Atual e Potenciais para o Hidrogênio Verde	Mostrar um panorama da indústria e de autores acadêmicos e institucionais atuantes no Brasil na área de hidrogênio, bem como uma visão geral sobre as principais tecnologias de aplicação de hidrogênio e Power-to-X, e o seu estado de maturidade no Brasil em comparação aos países líderes nessas tecnologias.	MME, no âmbito da Parceria Energética Brasil Alemanha	2021
Cooperação bilateral "H2Brasil" entre Alemanha e Brasil	Cooperação internacional para estudos envolvendo o uso do hidrogênio.	MME	2021
PL 725/2022	Disciplinar a inserção do hidrogênio como fonte de energia no Brasil e estabelecer parâmetros de incentivo ao uso do hidrogênio sustentável.	Senado Federal	2022
Decreto 21.200/2022	Instituir o Plano Estadual para a Economia do Hidrogênio Verde – PLEH2V no Estado da Bahia	Governo do Estado da Bahia	2022
PDE 2031	Tratar sobre o mercado de hidrogênio e suas perspectivas.	MME	2022

Resolução CNPE nº 6	Instituir o Programa Nacional do Hidrogênio, cria o Comitê Gestor do Hidrogênio e dá outras providências.	MME	2022
Primeira certificação brasileira de energia renovável	Fornecer para empreendimentos de geração de energia com níveis diferenciados de sustentabilidade, a chancela REC Brasil.	CCEE	2022
Consulta Pública 147/2022	Colher contribuições sobre o Plano de trabalho trienal 2023-2025 do PNH2.	MME	2022
PL 1878/2022	Criar a política que regula a produção e usos para fins energéticos do Hidrogênio Verde.	Senado Federal	2022
PL 2308/2023	Dispor sobre a definição legal de hidrogênio combustível e de hidrogênio verde.	Câmara dos deputados	2023
Criação da Comissão Especial de Debate de Políticas Públicas sobre o Hidrogênio Verde	Discutir e aprovar proposta de marco legal do hidrogênio de baixa emissão de carbono.	Senado Federal	2023
Instalação da Comissão Especial da Transição Energética e Produção do Hidrogênio Verde no Brasil	Construir um relatório em conjunto com especialistas, ambientalistas, Executivo e sociedade civil para que o texto possa contemplar o meio ambiente, a sustentabilidade e a economia verde.	Câmara dos deputados	2023

Fonte: Adaptado de Martins, 2023.

A implementação de cidades avançadas em hidrogênio não se limita apenas à produção, mas abrange a infraestrutura necessária para o transporte, armazenamento e distribuição do hidrogênio. A construção de uma rede integrada é crucial para garantir a viabilidade e eficácia desses projetos, envolvendo parcerias entre setores público e privado para investimentos em infraestrutura de ponta.

4 CONCLUSÃO

Observou-se que o mercado de hidrogênio carece de uma regulamentação abrangente. Atualmente, não existe uma base normativa que discipline todas as atividades econômicas associadas a esse mercado. A ausência de segurança normativa pode ser interpretada como um obstáculo para os investidores. Investir em um mercado desprovido de estrutura jurídica torna-se desafiador. A falta de regulação em todos os aspectos econômicos do mercado dificulta a efetiva implementação e funcionamento do mesmo. A clareza e consistência dessas normas proporcionam um ambiente regulatório estável, essencial para atrair investimentos e impulsionar o crescimento do setor.

REFERÊNCIAS

CASTRO, N. D. et al. **A economia do hidrogênio: transição, descarbonização e oportunidades para o Brasil**. 1. ed. Rio de Janeiro: E-papers, 2023. Disponível em: https://gesel.ie.ufrj.br/wp-content/uploads/2023/04/livro_economia_do_h2.pdf. Acesso: 06 de dezembro de 2023.

LAMEIRAS, F. L. **O hidrogênio como vetor de energia**. 2019. 90 p. Monografia (Diploma em Altos Estudos de Política e Estratégia.) - Escola Superior de Guerra, Rio de Janeiro, Brasil, 2019. Disponível em: https://antigo.mme.gov.br/c/document_library/get_file?uuid=1d8b37a8-a0d4-deee-74fe-02f4e4abc65d&groupId=36208. Acesso: 06 de dezembro de 2023.

MARTINS, D. **A Transição Energética e o Controle Externo: O Hidrogênio Verde como Vetor de Descarbonização**. Biblioteca Digital do Tribunal de Contas da União, 2023. Disponível em: <https://portal.tcu.gov.br/biblioteca-digital/a-transicao-energetica-e-o-controle-externo-o-hidrogenio-verde-como-vetor-de-descarbonizacao.htm>. Acesso: 06 de dezembro de 2023.

MORAES, L. L. **O cenário do hidrogênio verde: uma revisão como suporte ao recente interesse surgido em indústrias e governos na região**. 2022. 71f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica)- Unidade Acadêmica do Cabo de Santo Agostinho, Universidade Federal Rural de Pernambuco, 2022. Disponível em: <https://repository.ufrpe.br/handle/123456789/4225>. Acesso: 06 de dezembro de 2023.