

## CAPÍTULO 7

# AÇÕES ESTRUTURANTES PARA VIABILIZAÇÃO DA PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO RENOVÁVEL E DE BAIXO CARBONO NO BRASIL

---

**Leonardo Jaime Machado Simoes**

SENAICIMATEC, Salvador, Brasil

**Danielly Norberto Araujo**

SENAICIMATEC, Salvador, Brasil

**Gabriel Lucas Nascimento Silva**

SENAICIMATEC, Salvador, Brasil

**Filipe Malheiros Felix de Jesus**

SENAICIMATEC, Salvador, Brasil

**Rodrigo Lemos Miranda**

SENAICIMATEC, Salvador, Brasil

**Guilherme de Castro Figueiredo**

SENAICIMATEC, Salvador, Brasil

**André Gama**

Galp, Lisboa, Portugal

**Heloisa Althoff**

Petrogal, Rio de Janeiro, Brasil

**ABSTRACT:** In a global context where environmental concerns and the imminent energy transition are gaining increasing relevance, the decarbonization of processes emerges as a key strategy for sustainability, contributing to environmental preservation and mitigating the impacts of climate

change. Hydrogen ( $H_2$ ) stands out as an energy vector that can be produced through various methods and sources, with broad applications. Green hydrogen ( $H_2V$ ) and low-carbon hydrogen are promising solutions to address decarbonization challenges across multiple sectors. However, their global supply remains modest, requiring further projects and research to advance the technological, economic, and regulatory conditions needed for wider  $H_2$  adoption. This article aims to offer a holistic perspective on low-carbon hydrogen in Brazil, covering hydrogen classification, governmental and private initiatives, regulatory actions for the development of related activities, and the presentation of the main Research, Development, and Innovation (R&D&I) projects that finance technological advancement in the renewable/low-carbon hydrogen value chain. To achieve this objective, a mixed methodological approach, both quantitative and qualitative, was adopted, involving data collection through bibliographic and documental review in legislative databases, technical reports, scientific studies, and statistics from regulatory agencies. Accordingly, comparative analyses were carried out, along with an assessment of the Technology

Readiness Levels (TRL) of R&D&I projects and the mapping of national initiatives, thereby shedding light on quantitative aspects regarding the development stage of these projects and offering a comprehensive view of the Brazilian scenario in the context of the energy transition.

**KEYWORDS:** Energy Transition, Green Hydrogen, Low-Carbon Hydrogen.

## INTRODUÇÃO

O hidrogênio verde ( $H_2V$ ) e de baixo carbono surge como uma solução promissora para enfrentar os desafios da transição energética, incluindo o desequilíbrio entre oferta e demanda, a necessidade de infraestrutura adequada, a dificuldade de eletrificação em setores como transporte e a substituição de matérias-primas fósseis na indústria. O  $H_2V$  é produzido por eletrólise da água utilizando exclusivamente fontes renováveis, sem emissão de gases de efeito estufa. Já o hidrogênio de baixo carbono é obtido a partir de combustíveis fósseis, porém com tecnologias de captura e armazenamento de carbono, reduzindo suas emissões associadas (Hydrogen Council, 2017).

Apesar de ser uma alternativa limpa, sustentável e flexível de energia, menos de 0,1% da demanda global de hidrogênio em 2023 foi atendida por hidrogênio verde ou de baixo carbono. Assim, a demanda global de hidrogênio atingiu 97 Mt em 2023, representando um crescimento de 2,5% em relação a 2022, com uma produção inferior a 1 Mt proveniente de hidrogênio de baixo carbono (IEA, 2024). Nesse contexto, esforços significativos estão sendo realizados para expandir a produção de  $H_2V$  e de baixo carbono em escala global. Projeções indicam que o fornecimento de hidrogênio limpo poderá alcançar 48 Mt por ano até 2030, com aproximadamente 75% dessa oferta proveniente de hidrogênio renovável e o restante de baixo carbono. Além disso, estima-se que, com base nos projetos anunciados, a capacidade global de eletrolisadores instalados poderá atingir 375 GW até 2030. Considerando a capacidade operacional atual de 2 GW, será necessário um crescimento de quase 200 vezes nos próximos seis anos para atender a essa demanda (Hydrogen Council, 2024).

No entanto, para que essas projeções sejam atingidas, é necessário superar os desafios tecnológicos, econômicos e regulatórios. Nesse sentido, estímulos ao desenvolvimento de projetos de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação (PD&I), bem como de projetos piloto e demonstrativos, tornam-se essenciais. Adicionalmente, devido à transversalidade da utilização do hidrogênio, é necessário implementar estratégias nacionais direcionadas a diferentes setores econômicos e promover políticas públicas efetivas para impulsionar esse mercado emergente (Castro, 2021). Diante desse cenário, o objetivo do presente artigo é apresentar as iniciativas realizadas no Brasil para a promoção do  $H_2V$  ou de baixo carbono. O conjunto de referências foi selecionado para abranger bases legais, políticas públicas, estudos técnicos/científicos e dados estatísticos, com uma vigência temporal (2005-2024) que contempla um escopo histórico-evolutivo.

Assim, a Seção 2, norteada pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), descreve os principais métodos de produção de H<sub>2</sub>, assim como a sua classificação, eficiência e emissão de CO<sub>2</sub>. Com base em artigos recentes e internacionais da comunidade científica de H<sub>2</sub>, a Seção 3 levanta a produção por eletrólise, dando foco nas principais tecnologias, além de suas características de aplicação e nos desafios envolvidos. Na Seção 4, é traçada uma linha temporal evolutiva das iniciativas governamentais voltadas para a evolução do H<sub>2</sub> no contexto brasileiro, por meio de dados de órgãos reguladores e legislação nacional. Na Seção 5, ainda no cenário brasileiro, são apresentados não somente os projetos de PD&I, mas também o nível de maturidade tecnológica, utilizando, para isso, a base de dados dos principais agentes reguladores instruídos pelo Ministério de Minas e Energia (MME), como a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) e a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Em seguida, a Seção 6 conclui com alguns comentários finais.

## MODOS DE PRODUÇÃO DE H<sub>2</sub>

As cores do hidrogênio indicam, à primeira vista, tanto o processo de extração aplicado como a fonte de energia utilizada e o composto derivado. Além disso, indicam se a produção envolve ou não a Captura, Utilização e Sequestro de Carbono (CCUS, *Carbon Capture, Utilization and Storage*). No Quadro 1 é apresentado um resumo da classificação do hidrogênio em escala de cores, a eficiência energética e emissão de carbono referentes a cada rota de obtenção do H<sub>2</sub>.

A obtenção do Hidrogênio abrange técnicas que variam desde a gaseificação de combustíveis fósseis até a eletrólise da água, onde a fonte de energética utilizada nesses processos varia amplamente entre fontes renováveis e não-renováveis. Cada uma dessas técnicas possui singularidades que influenciam consideravelmente em diferentes aspectos, incluindo custo e pegada ambiental. Segundo a Empresa de Pesquisa Energética (Ferreira et al., 2021), o hidrogênio verde, por exemplo, é aquele produzido a partir de fontes renováveis (particularmente, energias eólica e solar) via eletrólise da água. Cada rota de produção de H<sub>2</sub> apresenta vantagens e desvantagens distintas em termos de eficiência, sustentabilidade e custos. Eficiência se refere ao percentual da relação de quantidade de energia consumida para produzir e a quantidade de final de matéria prima produzida (hidrogênio). Sustentabilidade se refere ao valor emitido de CO<sub>2</sub>. (Ferreira et al., 2021; IEA, 2023).

Nomenclatura H <sub>2</sub>	Modo de Produção	Eficiência	Emissão
 Preto	Derivado de antracito sem CCUS.	72%	26
 Marrom	Derivado de hulha, sem CCUS.	56%	26
 Cinza	Derivado de do gás natural sem CCUS.	72%	13
 Azul	A partir de gás natural ou outros combustíveis fósseis com CCUS.	54%	4,8
 Verde	A partir de fontes renováveis (particularmente, energias eólica e solar) via eletrólise da água.	67%	~0
 Branco	Hidrogênio natural ou geológico.	-	-
 Turquesa	Reforma a vapor do metano, sem gerar CO <sub>2</sub> .	71%	4,8
 Musgo	Produzido de biomassa ou biocombustíveis, com ou sem CCUS, através de reformas catalíticas, gaseificação ou biodigestão anaeróbica.	44% com CCUS ~5 sem CCUS <0	
 Rosa	A partir de fontes nuclear via eletrólise da água.	52%	<0,6

Quadro 1 – Classificação dos modos de produção do H<sub>2</sub>.

Fonte: Adaptado de (Ferreira et al., 2021; IEA, 2023; Valente, 2021; Younas et al., 2022)

## PRODUÇÃO DE H<sub>2</sub> POR ELETRÓLISE

A eletrólise é um processo eletroquímico que utiliza a energia elétrica para promover a reação não espontânea de quebra da molécula da água, gerando oxigênio e hidrogênio (Hassan et al., 2023). A eficiência energética do processo depende da tecnologia utilizada, da pureza da água e da energia elétrica fornecida (Cavaliere, 2023). Para ser sustentável, a eletricidade usada deve vir de fontes renováveis (solar, eólica, hidroelétrica), garantindo que o H<sub>2</sub> produzido seja considerado “hidrogênio verde” (Ferreira et al., 2021; Taibi et al., 2020)

As principais tecnologias de eletrolisadores são: membrana eletrolítica polimérica trocadora de prótons (PEM, *Proton Exchange Membrane Electrolyzer*), que possui uma membrana polimérica com permeabilidade seletiva à passagem de íons H<sup>+</sup>; óxido de sódio (SOE, *Solid Oxide Electrolysis*), o qual realiza a eletrólise da água no seu estado de vapor em altas temperaturas; e o alcalino (AWE, *Alkaline Water Electrolysis*), que utiliza uma solução alcalina composta por hidróxido de potássio (KOH) para aumentar a condutividade iônica da água (Bodner; Hofer; Hacker, 2015; Carmo et al., 2013; Xu et al., 2024).

Atualmente, a difusão tecnológica dos eletrolisadores esbaram em desafios técnicos, tais como o desenvolvimento de materiais duráveis e economicamente viáveis para eletrodos e membranas; a redução do consumo energético do processo; a escalabilidade das plantas de eletrólise para atender à demanda crescente, dentre outros (Tseng; Lee; Friley, 2005; Zhang et al., 2021; Smolinka et al., 2022). Os desafios econômicos envolvem o custo de produção. O preço da energia elétrica é o principal componente do custo do H<sub>2</sub> por eletrólise, e o custo de produção de hidrogênio por eletrólise é mais caro que o produzido por rotas mais poluentes. (IEA, 2023). Dessa forma, a competitividade do hidrogênio verde, assim como sua viabilidade, depende da redução do custo da eletricidade renovável e do aumento da eficiência dos eletrolisadores (Sayed-Ahmed; Toldy; Santasalo-Aarnio, 2024).

Investimentos em pesquisa, implantação de projetos piloto e hubs de hidrogênio, políticas públicas, financiamentos e subsídios são essenciais para viabilizar projetos em estágio inicial e promover a economia do hidrogênio verde. Principalmente, pelo papel chave do hidrogênio verde para alcançar as metas de emissões líquidas zero (*Net Zero*), especialmente em setores difíceis de descarbonizar (Li; Lukszo; Schmitz, 2023). A demanda por hidrogênio verde é inerente aos setores industriais que estão migrando para o uso de hidrogênio verde para descarbonização, como a siderurgia, o setor químico e o transporte pesado (Muhammed et al., 2023). Também pode atuar como vetor energético para armazenar energia renovável intermitente (Hossain et al., 2023).

## PRINCIPAIS INICIATIVAS GOVERNAMENTAIS NO BRASIL

Desde 1995, o Brasil empreende esforços para desenvolver iniciativas relacionadas ao hidrogênio e suas tecnologias. O Ministério da Ciência Tecnologia e Inovação (MCTI) iniciou sua atuação na temática da Energia do Hidrogênio, implementando o Centro Nacional de Referência em Energia do Hidrogênio (CENEH), em 1998. Em 2002, houve o estabelecimento do Programa Brasileiro de Hidrogênio e Sistemas de Células a Combustível (ProCaC), renomeado em 2005 como Programa de Ciência, Tecnologia e Inovação para a Economia do Hidrogênio (ProH2), que tinha como objetivo estimular e apoiar iniciativas e projetos voltados para o hidrogênio e sistemas de células a combustível. O ProH2 foi interrompido em 2012 (MME, 2021).

Em 2003, o Brasil ingressou na Parceria Internacional para o Hidrogênio e Células Combustíveis na Economia (IPHE, *Internacional Partnership for Hydrogen and Fuel Cells in the Economy*), que é uma colaboração para o fomento de tecnologias de hidrogênio e das células a combustível (MCTIC, 2018). O “Roteiro para a Estruturação da Economia do Hidrogênio no Brasil” publicado pelo Ministério de Minas e Energia (MME) em 2005, impôs metas no horizonte de 20 anos, enfatizando as diferentes rotas tecnológicas das quais o Brasil pudesse obter vantagens competitivas. Em 2012, no *Workshop Internacional sobre Hidrogênio e Células a Combustível* (WICaC), o MCTI apresentou questões importantes após 10 anos de investimentos em projetos na área. A Associação Brasileira do Hidrogênio (ABH2) foi criada em 2017, a fim de coordenar as ações e recursos (públicos e privados) envolvendo o H<sub>2</sub>V (Pereira et al., 2021).

Em 2018, o Plano de Ciência, Tecnologia e Inovação para Energias Renováveis e Biocombustíveis (2018-2022), publicado pelo MCTI, disponibilizou um diagnóstico aprofundado do potencial do H<sub>2</sub>. O Plano ressalta que a diversidade energética inerente ao Brasil potencializa cenários onde a produção de hidrogênio por meio da eletrólise seja vantajosa, especialmente no aproveitamento dos excedentes de energia elétrica intrínsecos às fontes renováveis solar e eólica (MCTIC, 2018; Ferreira et al., 2021).

Em 2020, as parcerias desenvolvidas pelo MME com a Alemanha começaram a incorporar atividades voltadas para a identificação de possibilidades de cooperação com a Alemanha em hidrogênio, o “Estudo de Mapeamento Setorial do Hidrogênio Verde no Brasil” desenvolvido pela Agência Alemã de Cooperação Internacional (GIZ, Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit) é fruto desse acordo (GIZ, 2021). Em 2020 o hidrogênio verde foi incluído no Plano Nacional de Energia até 2050 (PNE 2050) pelo MME, prevendo investimentos em pesquisa e desenvolvimento para aprimorar a produção de hidrogênio no país, além de incentivos para a utilização dessa fonte de energia em diferentes setores da economia (MCTIC, 2018).

Com isso em vista, em 2022 foi publicada a Resolução nº 6, do Conselho Nacional de Política Energética (CNPE), que institui o Programa Nacional do Hidrogênio (PNH2) e estabelece a estrutura de governança do programa (CNPE, 2022). O PNH2 almeja promover o desenvolvimento da cadeia de valor do hidrogênio verde no Brasil, incluindo a pesquisa, desenvolvimento, demonstração, industrialização e comercialização da tecnologia. O programa também prevê a criação de um observatório do mercado de hidrogênio verde, além de estudos para identificar oportunidades e desafios ao setor.

Além disso, antes da Resolução CNPE nº 6/2022, outras decisões do colegiado de ministros já identificavam o papel estratégico que o hidrogênio pode desempenhar num futuro de economias descarbonizadas, como a Resolução CNPE nº 2/2021, a qual definiu o hidrogênio como um dos temas prioritários para investimentos em pesquisa e desenvolvimento da ANP e da ANEEL, e a Resolução CNPE nº 6/2021, que orientou a definição de diretrizes para o Programa (CNPE, 2022). Além disso, o MCTI lançou uma

chamada pública de subvenção econômica da Financiadora de Estudos e Projetos FINEP, no valor de R\$ 50 milhões, para incentivar o desenvolvimento e/ou adaptação de plantas piloto para combustíveis sustentáveis, como bioquerosene para aviação, biometano e hidrogênio (MCTI; FINEP, 2022).

Em 2023, o MCTI publicou a portaria MCTI nº 7.679/2023, que formalizou a Iniciativa Brasileira do Hidrogênio (IBH2) para a promoção de ações governamentais relacionadas ao hidrogênio e suas aplicações, além de instituir o Sistema Brasileiro de Laboratórios de Hidrogênio (SisH2-MCTI). Este visa impulsionar o avanço científico, tecnológico e empreendedor na área do hidrogênio, além de promover parcerias entre instituições científicas e o setor privado (MCTI, 2023).

Ainda em 2023, a ANEEL anunciou chamada pública para definição da chamada estratégica para projetos de Hidrogênio Verde. A Chamada Estratégica de PD&I nº 23/2024 possui foco no “Hidrogênio no Contexto do Setor Elétrico Brasileiro” e busca explorar o potencial do hidrogênio como vetor energético para descarbonizar a economia brasileira e promover inovações tecnológicas no setor elétrico (ANEEL, 2024a). Em 2024, a chamada estratégica da ANEEL foi publicada, 24 propostas foram submetidas e um total de R\$ 2,7 bilhões, com R\$ 1,16 bilhões de contrapartidas de empresas, foram apontados como investimentos (ANEEL, 2024a). Em agosto de 2024, foi instituído o marco legal do hidrogênio verde, o qual dispõe sobre a Política Nacional do Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono, institui incentivos para a indústria do hidrogênio de baixa emissão de carbono, e cria o um programa de desenvolvimento das tecnologias relacionadas ao hidrogênio (BRASIL, 2024).

## PROJETOS DE PDI

As informações sobre investimento em PD&I disponibilizadas pela ANP e ANEEL (ANEEL, 2024c; ANP, 2024) mostram que a ANP tem concentrado seus esforços em projetos voltados para a produção, armazenamento e uso do hidrogênio como fonte de energia de baixo carbono, em colaboração com empresas do setor de petróleo e gás. Por outro lado, a ANEEL tem apoiado projetos focados na integração do hidrogênio na matriz elétrica, especialmente em iniciativas de geração de energia em usinas e sistemas de microrredes, envolvendo empresas de geração de energia. Em relação aos investimentos, os projetos financiados pela ANP entre os anos de 2017 e 2024 variam entre aproximadamente R\$ 79 mil e R\$ 89 milhões, enquanto os investimentos da ANEEL entre os anos de 2010 e 2023 têm aportes financeiros que vão de R\$ 296 mil a R\$ 48,5 milhões.

O estudo de mapeamento, realizado pela Associação Brasileira do Hidrogênio (ABH2) e pela Rede de Inovação dos Países Baixos (NIN), oferece um panorama sobre o setor de pesquisa, desenvolvimento e inovação em hidrogênio no Brasil (ABH2, 2024). Os resultados apresentam a situação dos Níveis de Maturidade Tecnológica (TRL, *Technology*

*(Readiness Levels)* dos projetos em curso no país, os projetos foram classificados por a faixa de TRL mais adequada para a atividade de PD&I (Figura 1). A Figura 1 apresenta a quantidade de projetos de PD&I por região, evidenciando a alta concentração de projetos na faixa de TRL 3-5, o que indica um setor em transição, com muitas iniciativas passando da pesquisa básica para estágios mais aplicados.

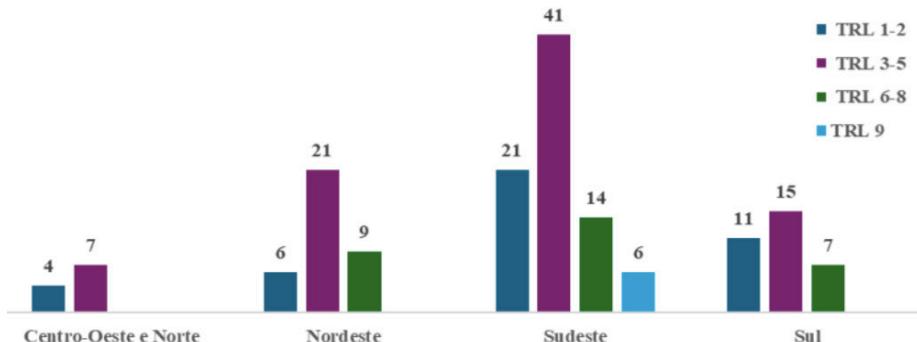


Figura 1: Nível de maturidade tecnológica dos projetos de PD&I por região.

Fonte: (ABH2, 2024)

Dentre os principais projetos de H<sub>2</sub> no Brasil, destaca-se o HUB de Hidrogênio Verde no Porto do Pecém, que está situado no estado do Ceará. Atualmente, o HUB já possui uma planta em operação de produção de hidrogênio, que funciona desde 2021, composta por um sistema de geração solar com capacidade de 3 MW e um módulo eletrolisador, capaz de produzir 250 m<sup>3</sup>/h de H<sub>2</sub>V. O valor investido nessa planta foi de R\$ 42 milhões e já recebeu a certificação da Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (Gontijo, 2023). Além disso, a partir de 2025, espera-se que o HUB de H<sub>2</sub>V do Pecém possua uma produção 1,3 milhão de toneladas de hidrogênio até 2030. Nesse sentido, há uma série de empresas cotadas para instalar plantas de produção de hidrogênio até 2025, tais como: Casa dos Ventos e Comerc, Fortescue, AES, entre outras (Chiappini, 2023).

Já no Porto de Suape, localizado em Pernambuco, a empresa White Martins iniciou a produção de hidrogênio verde em 2022, certificada pela agência alemã TÜV Rheinland. A unidade da White Martins tem capacidade para fornecer 156 toneladas por ano. Além disso, a empresa Qair espera investir cerca de US\$ 3,9 bilhões até 2032 para produção de H<sub>2</sub>V e hidrogênio azul. No porto de Açu, localizado no Rio de Janeiro, por sua vez, há diferentes MoU assinados para projetos de produção de hidrogênio (Chiappini, 2023). Em 2024, a Neoenergia anunciou a inauguração de uma planta de hidrogênio em Brasília, prevista para 2025. Assim, o projeto, que receberá um investimento de R\$ 30 milhões, incluirá uma usina fotovoltaica de 150 kWp e uma unidade de abastecimento veicular de H<sub>2</sub>V (Campos, 2024).

A Eletronuclear, por sua vez, estuda implementar uma planta de beneficiamento de hidrogênio em Angra dos Reis, no Rio de Janeiro. A empresa, desde 1997, já dispõe de uma estrutura que gera como produto o hipoclorito de sódio e hidrogênio, como subproduto. Recentemente, a Eletronuclear apresentou um projeto com capacidade de produzir 100 toneladas de H<sub>2</sub> por ano e que, com a finalização das obras de Angra 3, a nova capacidade de geração seja de 167 toneladas anualmente (Petronotícias, 2023; Souza, 2021). A Petrobras assinou um Termo de Cooperação com o Instituto Senai de Energias Renováveis para construir uma planta piloto de eletrólise, visando estudar a produção de hidrogênio sustentável usando energia solar. A usina, localizada no Rio Grande do Norte, terá capacidade de 2,5 MWp para alimentar a unidade de eletrólise. O hidrogênio produzido será utilizado para avaliar o desempenho e integridade estrutural de microturbinas em misturas de hidrogênio e gás natural. O projeto, com duração de três anos, terá um investimento de R\$ 90 milhões (Petrobras, 2024).

Assim, apesar das potencialidades do território nacional para a produção de hidrogênio, devido aos elevados custos de produção e às incertezas associadas às tecnologias, entre outros fatores (Muhammed et al., 2023; Ishaq; Dincer; Crawford, 2022), ainda são poucos os projetos que envolvam a produção e a aplicação de H<sub>2</sub>V. Nesse sentido, projetos de PD&I têm sido desenvolvidos para viabilizar a disseminação dessa tecnologia e fomentar a economia de baixo carbono no Brasil.

## CONCLUSÕES

O principal objetivo do artigo foi apresentar as ações já realizadas para promoção do H<sub>2</sub>V e de baixo carbono no Brasil. Dessa forma, entre outros aspectos, algumas das iniciativas governamentais já realizadas foram destacadas e apresentadas, observando-se que órgãos governamentais têm atuado desde 1995 na definição de estratégias e desenvolvimentos de estudos. Ademais, listou-se projetos de PD&I que possuísem como objetivo o estudo ou implantação de plantas de produção de H<sub>2</sub>V ou de baixo custo, sendo visto que a região Nordeste tem se destacado nesses quesitos. Foi visto que a maioria dos projetos são desenvolvidos via fomentos ANP e ANEEL, com cerca de 140 milhões investidos. Assim, esses esforços refletem o compromisso com a transição energética no Brasil, destacando-se como iniciativas mitigatórias dos impactos ambientais por meio do uso do hidrogênio. Em conjunto, os projetos mapeados pela ABH2 indicaram maturidades tecnológicas que variam entre os níveis 3 a 5. A partir disso, pode-se concluir que os projetos existentes no Brasil estão concentrados em atividades de pesquisa de plantas em escala laboratorial, em que projetos piloto e de demonstração são necessários para avaliação da produção de hidrogênio em escala.

## REFERÊNCIAS

- ABH2. **Mapping Study for the Brazilian Hydrogen RD&I Sector.** ABH2, 2024. Disponível em: <[Mapeamento de P&DI em H2 — ABH2](https://www.gov.br/mapeamento-de-pdi-em-h2-abh2)>. Acesso em: 14 jan. 2025.
- ANEEL. **ANEEL aprova Chamada para projetos de hidrogênio no contexto do Setor Elétrico.** ANEEL, 2024a. Disponível em: <<https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/noticias/2024/aneel-aprova-chamada-para-projetos-de-hidrogenio-no-contexto-do-setor-eletrico>>. Acesso em: 17 dez. 2024.
- ANEEL. **Chamada Estratégica de PDI n.º 023/2024: Hidrogênio no Contexto do Setor Elétrico Brasileiro.** ANEEL, 2024b. Disponível em: <[https://www2.aneel.gov.br/cedoc/adsp2024778\\_2.pdf](https://www2.aneel.gov.br/cedoc/adsp2024778_2.pdf)>. Acesso em: 5 jan. 2025.
- ANEEL. **Dados Abertos - Agência Nacional de Energia Elétrica estatísticas.** ANEEL, 2024c. Disponível em: <<https://dadosabertos.aneel.gov.br/>>. Acesso em: 16 dez. 2024.
- ANP. **Dados Abertos.** ANP, 2024. Disponível em: <<https://dados.gov.br/dados/organizacoes/visualizar/agencia-nacional-do-petroleo-gas-natural-e-biocombustiveis-anp>>. Acesso em: 16 dez. 2024.
- BODNER, Merit; HOFER, Astrid; HACKER, Viktor. H<sub>2</sub> generation from alkaline electrolyzer: H<sub>2</sub> generation from alkaline electrolyzer. **WIREs Energy and Environment**, v. 4, n. 4, p. 365–381, 2015. DOI 10.1002/wene.150. Disponível em: <<https://doi.org/10.1002/wene.150>>. Acesso em: 20 nov. 2024.
- BRASIL. **Lei nº 14.948, de 2 de agosto de 2024.** Planalto, 2024. Disponível em: <[https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_Ato2023-2026/2024/Lei/L14948.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2023-2026/2024/Lei/L14948.htm)>. Acesso em: 16 dez. 2024.
- CAMPOS, Geraldo. Neoenergia investirá R\$ 30 mi em planta de hidrogênio verde em Brasília. **Poder 360.** Disponível em: <<https://www.poder360.com.br/>>. Acesso em: 17 jan. 2025.
- CARMO, Marcelo; FRITZ, David L.; MERGEL, Jürgen; STOLTEN, Detlef. A comprehensive review on PEM water electrolysis. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 38, n. 12, p. 4901–4934, 2013. DOI 10.1016/j.ijhydene.2013.01.151. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.01.151>>. Acesso em: 20 nov. 2024.
- CASTRO, Nivalde; LEAL, Sérgio; ELIZIÁRIO, Sayonara; MOSzkowicz, Maurício; SERRA, Eduardo; CHAVES, Ana Carolina; BRANQUINHO, Adely; PRADELLE, Florian; CHANTRE, Caroline; CAMPELLO, Rodrigo; BOTELHO, Vinicius. **A perspectivas da economia do hidrogênio e o setor energético brasileiro.** Rio de Janeiro, RJ: Gesel - Ufrj, 2021. Disponível em: <<https://gesel.ie.ufrj.br/publicacao/perspectivas-da-economia-do-hidrogenio-no-setor-energetico-brasileiro/>>. Acesso em: 17 jan. 2025.
- CAVALIERE, Pasquale. **Water Electrolysis for Hydrogen Production.** Cham: Springer International Publishing, 2023. DOI 10.1007/978-3-031-37780-8. Disponível em: <<https://link.springer.com/10.1007/978-3-031-37780-8>>. Acesso em: 17 jan. 2025.
- CHIAPPINI, Gabriel. **Hidrogênio verde: conheça 10 projetos promissores em desenvolvimento no Brasil.** Eixos, 2023. Disponível em: <<https://eixos.com.br/hidrogenio/hidrogenio-verde-conheca-16-projetos-promissores-em-desenvolvimento-no-brasil/>>. Acesso em: 14 ago. 2024.
- CNPE. **Resolução n.º 6, de 23 de junho de 2022.** Gov, 2022. Disponível em: <<https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/conselhos-e-comites/cnpe/resolucoes-do-cnpe/2022/Res62022.pdf>>. Acesso em: 17 jan. 2025.

FERREIRA, Thiago; MACHADO, Giovani; SOARES, Jeferson; ACHÃO, Carla; ALMEIDA, Elisângela; BOTELHO, Glauce; ANDRADE, Gustavo. **Bases para a Consolidação da Estratégia Brasileira do Hidrogênio**. EPE, 2021. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/nota-tecnica-bases-para-a-consolidacao-da-estrategia-brasileira-do-hidrogenio>>. Acesso em: 17 jan. 2025.

GIZ. **Mapeamento do Setor de Hidrogênio Brasileiro: Panorama Atual e Potenciais para o Hidrogênio Verde**. Câmara de Comércio e Indústria Brasil-Alemanha - Rio de Janeiro: [s.n.], 2021. Disponível em: <[energypartnership.com.br/fileadmin/brazil/media\\_elements/Mapeamento\\_H2\\_-\\_Diagramado\\_-\\_V2g.pdf](https://energypartnership.com.br/fileadmin/brazil/media_elements/Mapeamento_H2_-_Diagramado_-_V2g.pdf)>. Acesso em: 09 dez. 2024.

GONTIJO, Juliana. **1ª planta de hidrogênio verde do País entra em operação**. Diário do Comércio, 2023. Disponível em: <<https://diariodocomercio.com.br/economia/primeira-planta-hidrogenio-verde-brasil-entra-operacao/#gref>>. Acesso em: 9 ago. 2024.

HASSAN, Qusay; ABDULATEEF, Ammar; HAFEDH, Saadoon; AL-SAMARI, Ahmed; ABDULATEEF, Jasim; SAMEEN, Aws; SALMAN, Hayder; AL-JIBOORY, Ali; WIETESKA, Szymon; JASZCZUR, Marek. Renewable energy-to-green hydrogen: A review of main resources routes, processes and evaluation. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 48, n. 46, p. 17383–17408, 2023. DOI 10.1016/j.ijhydene.2023.01.175. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.01.175>>. Acesso em: 20 nov. 2024.

HOSSAIN, Md. Arafat; ISLAM, Md. Rashidul; HOSSAIN, Md. Alamgir; HOSSAIN, M.J. Control strategy review for hydrogen-renewable energy power system. **Journal of Energy Storage**, v. 72, p. 108170, 2023. DOI 10.1016/j.est.2023.108170. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.est.2023.108170>>. Acesso em: 20 nov. 2024.

HYDROGEN COUNCIL. **How hydrogen empowers the energy transition**. [s.l.]: Hydrogen Council, 2017. Disponível em: <<https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2017/06/Hydrogen-Council-Vision-Document.pdf>>. Acesso em: 14 jan. 2025.

HYDROGEN COUNCIL. **Hydrogen Insights September 2024**. Hydrogen Council, 2024. Disponível em: <Hydrogen Insights 2024 | Hydrogen Council>. Acesso em: 14 jan. 2025.

IEA. **Global Hydrogen Review 2023**. IEA, 2023. Disponível em: <Global Hydrogen Review 2023 – Analysis - IEA>. Acesso em: 14 jan. 2025.

IEA. **Global Hydrogen Review 2024**. IEA, 2024. Disponível em: <Global Hydrogen Review 2024 – Analysis - IEA>. Acesso em: 14 jan. 2025.

ISHAQ, Haris; DINCER, Ibrahim; CRAWFORD, Curran. A review on hydrogen production and utilization: Challenges and opportunities. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 47, n. 62, p. 26238–26264, 2022. DOI 10.1016/j.ijhydene.2021.11.149. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.11.149>>. Acesso em: 20 nov. 2024.

LI, Na; LUKSZO, Zofia; SCHMITZ, John. An approach for sizing a PV–battery–electrolyzer–fuel cell energy system: A case study at a field lab. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 181, p. 113308, 2023. DOI 10.1016/j.rser.2023.113308. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113308>>. Acesso em: 20 nov. 2024.

MCTI. **Portaria MCTI nº 7.679, de 17.11.2023**. MCTI, 2023. Disponível em: <[https://antigo.mctic.gov.br/mctic/opencms/legislacao/portarias/Portaria\\_MCTI\\_n\\_7679\\_de\\_17112023.html#:~:text=Disp%C3%B5e%20sobre%20o%20Sistema%20Brasileiro,que%20he%20confere%20o%20art.](https://antigo.mctic.gov.br/mctic/opencms/legislacao/portarias/Portaria_MCTI_n_7679_de_17112023.html#:~:text=Disp%C3%B5e%20sobre%20o%20Sistema%20Brasileiro,que%20he%20confere%20o%20art.)>. Acesso em: 27 dez. 2024.

MCTI; FINEP. **SELEÇÃO PÚBLICA MCTI/FINEP/FNDCT - Subvenção Econômica à Inovação – 18/2022: Biotecnologia aplicada aos temas atuais de saúde humana, agropecuária, meio ambiente e indústria.** MCTI, 2022. Disponível em: <[http://www.finep.gov.br/images/chamadas-publicas/2022/26-08-2022Edital\\_SBV\\_FINEP\\_MCTI\\_BIOTEC\\_20220818\\_final.pdf](http://www.finep.gov.br/images/chamadas-publicas/2022/26-08-2022Edital_SBV_FINEP_MCTI_BIOTEC_20220818_final.pdf)>. Acesso em: 27 dez. 2024.

MCTC. **Plano de ciência, tecnologia e inovação para energias renováveis e biocombustíveis: 2018-2022.** [s.l.]: Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações, 2018. Disponível em: <<https://antigo.mctic.gov.br/mctic/export/sites/institucional/tecnologia/tecnologiasSetoriais/Plano-de-Ciencia-Tecnologia-e-Inovacao-Para-Energias-Renovaveis-e-Biocombustiveis.pdf>>. Acesso em: 27 dez. 2024.

MUHAMMED, Nasiru S.; GBADAMOSI, Afeez O.; EPELLE, Emmanuel I.; ABDULRASHEED, Abdulrahman A.; HAQ, Bashirul; PATIL, Shirish; AL-SHEHRI, Dhafer; KAMAL, Muhammad Shahzad. Hydrogen production, transportation, utilization, and storage: Recent advances towards sustainable energy. **Journal of Energy Storage**, v. 73, p. 109207, 2023. DOI 10.1016/j.est.2023.109207. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.est.2023.109207>>. Acesso em: 20 nov. 2024.

PEREIRA, Marisete; COSTA, Agnes; COSTA, Patricia; DOMINGUES, Paulo; COSTA, Marcello. **Programa Nacional do Hidrogênio - Proposta de Diretrizes.** [s.l.: s.n.], 2021. Disponível em: <<https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/mme-apresenta-ao-cnpe-proposta-de-diretrizes-para-o-programa-nacional-do-hidrogenio-prnh2/HidrogenioRelatroidiretrizes.pdf>>. Acesso em: 27 dez. 2024.

PETROBRAS. **Petrobras investirá R\$90 milhões em pesquisas para hidrogênio sustentável.** Agência Petrobras, 2024. Disponível em: <<https://agencia.petrobras.com.br/w/petrobras-investira-r-90-milhoes-em-pesquisas-para-hidrogenio-sustentavel>>. Acesso em: 8 jan. 2025.

PETRONOTÍCIAS. **ELETRONUCLEAR VAI USAR AS USINAS NUCLEARES PARA PRODUZIR PELO MENOS 100 TONELADAS DE HIDROGÊNIO VERDE POR ANO.** Petronotícias, 2023. Disponível em: <<https://petronoticias.com.br/eletrownuclear-vai-usar-as-usinas-nucleares-para-produzir-peло-menos-100-toneladas-de-hidrogenio-verde-por-ano/>>. Acesso em: 17 jan. 2025.

SAYED-AHMED, H.; TOLDY, Á.I.; SANTASALO-AARNIO, A. Dynamic operation of proton exchange membrane electrolyzers—Critical review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 189, p. 113883, 2024. DOI 10.1016/j.rser.2023.113883. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113883>>. Acesso em: 20 nov. 2024.

SMOLINKA, Tom; BERGMANN, Henry; GARCHE, Juergen; KUSNEZOFF, Mihails. The history of water electrolysis from its beginnings to the present. In: **Electrochemical Power Sources: Fundamentals, Systems, and Applications.** [s.l.]: Elsevier, 2022, p. 83–164. DOI 10.1016/C2018-0-05096-3. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780128194249000100>>. Acesso em: 17 jan. 2025.

SOUZA, Davi. **PROJETO INOVADOR DA ELETRONUCLEAR PODE COLOCAR A EMPRESA NA VANGUARDA DA PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO VERDE NO PAÍS.** Petronotícias, 2021. Disponível em: <<https://petronoticias.com.br/projeto-inovador-da-eletrownuclear-pode-colocar-a-empresa-na-vanguarda-da-producao-de-hidrogenio-verde-no-pais/>>. Acesso em: 4 nov. 2024.

TAIBI, Emanuele; BLANCO, Herib; MIRANDA, Raul; CARMO, Marcelo. **Green hydrogen cost reduction: Scaling up electrolyzers to meet the 1.5C climate goal.** IRENA, 2020. Disponível em: <[www.irena.org/publications](http://www.irena.org/publications)>. Acesso em: 17 jan. 2025.

TSENG, Phillip; LEE, John; FRILEY, Paul. A hydrogen economy: opportunities and challenges. **Energy**, v. 30, n. 14, p. 2703–2720, 2005. DOI 10.1016/j.energy.2004.07.015. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.energy.2004.07.015>>. Acesso em: 20 nov. 2024.

VALENTE, Antonio; IRIBARREN, Diego; DUFOUR, Javier. Harmonised life-cycle indicators of nuclear-based hydrogen. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 46, n. 57, p. 29724–29731, 2021. DOI 10.1016/j.ijhydene.2020.10.083. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.10.083>>. Acesso em: 20 nov. 2024.

XU, Yuhao; CAI, Shanshan; CHI, Bo; TU, Zhengkai. Technological limitations and recent developments in a solid oxide electrolyzer cell: A review. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 50, p. 548–591, 2024. DOI 10.1016/j.ijhydene.2023.08.314. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.08.314>>. Acesso em: 20 nov. 2024.

YOUNAS, Muhammad; SHAFIQUE, Sumeer; HAFEEZ, Ainy; JAVED, Fahad; REHMAN, Fahad. An Overview of Hydrogen Production: Current Status, Potential, and Challenges. **Fuel**, v. 316, p. 123317, 2022. DOI 10.1016/j.fuel.2022.123317. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.123317>>. Acesso em: 20 nov. 2024.

ZHANG, Bing; ZHANG, Sui-Xin; YAO, Rui; WU, Yong-Hong; QIU, Jie-Shan. Progress and prospects of hydrogen production: Opportunities and challenges. **Journal of Electronic Science and Technology**, v. 19, n. 2, p. 100080, 2021. DOI 10.1016/j.jnlest.2021.100080. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jnlest.2021.100080>>. Acesso em: 20 nov. 2024.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio técnico e financeiro da Petrogal Brasil S.A. (Joint Venture Galp I Sinopec) e o fomento à Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação (P,D&I) no Brasil concedido pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) e pela Empresa Brasileira de Pesquisa e Inovação Industrial (EMBRAPII) para a execução deste projeto, intitulado “Avaliação técnico-científica de soluções para produção, armazenamento, transporte e consumo de hidrogênio verde, e seus impactos e oportunidades na cadeia de energia”, que resultou nesse artigo.