

HIDROGÊNIO VERDE NO BRASIL: UMA ANÁLISE DAS BARREIRAS PARA SUA ADOÇÃO EM LARGA ESCALA

1 INTRODUÇÃO

Não é novidade que o hidrogênio verde (H2V) tem emergido como um vetor energético promissor na transição global para uma economia de baixo carbono, especialmente em países com grande potencial de energias renováveis como o Brasil (BEZERRA, 2021) (FERNANDES *et al.*, 2023). Segundo o Ministério de Minas e Energia (MME), o país é referência por possuir uma matriz energética predominantemente limpa, com 93,1% de energia proveniente de fontes renováveis em 2023. Tal fato posiciona-o de forma privilegiada, para se tornar um líder na produção de H2V (GOMES *et al.*, 2024). No entanto, a plena adoção e o desenvolvimento da cadeia de valor do hidrogênio verde no país enfrentam desafios significativos, incluindo a necessidade de ganhos de maturidade tecnológica e a superação de barreiras regulatórias, econômicas e infraestruturais (STIFTUNG, 2021).

Diversos estudos destacam a viabilidade e as vantagens competitivas do Brasil para a produção de hidrogênio verde. O país pode se tornar um protagonista no mercado internacional de H2V, em razão de sua abundância de recursos renováveis (GARLET *et al.*, 2024). Projetos específicos reforçam ainda mais esse potencial: por exemplo, a modelagem de uma planta de grande porte próxima ao porto de Pecém (CE) aponta para a viabilidade técnica e econômica da produção de H2V em ambiente costeiro, com sinergias logísticas e energéticas (FEITOSA; COSTA, 2025). No plano institucional e regulatório, o Brasil tem buscado estabelecer estruturas mais favoráveis, onde, por meio da Resolução nº 6, de 23 de junho de 2022, atualizada pela Resolução nº 4 de 20 de março de 2023, foi criado o Programa Nacional do Hidrogênio (PNH2), com o objetivo de fortalecer o mercado e a indústria do hidrogênio enquanto vetor energético no Brasil, aproveitando os recursos hidrelétricos, eólicos e solares do país (CNI, 2022).

Diante desse cenário, é essencial analisar os principais fatores tanto impulsionadores quanto limitadores da adoção em larga escala do H2V no Brasil. Dessa forma, o presente trabalho tem como objetivo analisar e identificar as principais barreiras que dificultam a ampla adoção do hidrogênio verde no Brasil. Busca-se compreender como aspectos tecnológicos, econômicos e regulatórios impactam a consolidação dessa fonte energética no país. Além disso, serão investigados os avanços já alcançados na área, evidenciando as inovações que podem contribuir para a redução de custos e para o aumento da competitividade do H2V. Também serão explorados os entraves relacionados à infraestrutura necessária para produção, armazenamento e distribuição em escala comercial. Questões ligadas ao financiamento e à formulação de políticas públicas serão discutidas como fatores determinantes para viabilizar a transição energética. O estudo pretende, ainda, analisar as perspectivas do avanço deste combustível no Brasil, apontando caminhos para superar os desafios atuais e impulsionar o desenvolvimento sustentável do hidrogênio verde no país.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 AVANÇOS TECNOLÓGICOS DO H2V NO BRASIL

Nos últimos anos, estudos têm mostrado avanços tecnológicos relevantes na integração do H2V com o sistema elétrico brasileiro, destacando a singularidade de uma matriz altamente renovável e com grande armazenamento hidrelétrico. Análises de integração de eletrólise à rede indicam que o Brasil pode produzir hidrogênio eletrolítico com baixa intensidade de carbono quando são observados critérios de “integridade de carbono”, ou seja, de modo que sejam

quantificados todos os processos que envolvem seu ciclo de vida, aproveitando a flexibilidade hídrica e altas participações de energia eólica e solar (DRIEMEIER *et al.*, 2025).

Conforme Feitosa e Costa (2025), um exemplo do avanço tecnológico da produção de H2V no Brasil é o caso das modelagens para plantas de grande porte em Pecém (CE). Onde avaliou-se configurações *off-grid* e híbridas (solar-eólica) e foram demonstrados ganhos de competitividade via desenho superior do sistema e gestão operacional. De forma complementar, revisões setoriais mapeiam barreiras tecnológicas e rotas de superação, por meio de padrões de certificação, cadeia de suprimentos de eletrolisadores e acoplamento setorial, reforçando que as inovações no Brasil estão migrando do piloto à pré-escala industrial (GARLET *et al.*, 2024). No acoplamento a recursos renováveis, surgem soluções que exploram especificidades brasileiras. Segundo Botelho *et al.* (2024), um avanço tecnológico brasileiro nesse sentido é o uso de energia vertida de hidrelétricas (*hidro spill*) para alimentar a eletrólise, reduzindo curta-intermitência e viabilizando operação com custos nivelados competitivos. Em paralelo, outro aspecto tecnológico que explora um recurso extensivo no Brasil é a produção de hidrogênio renovável a partir de biomassa/biometano, abrindo espaço para derivados (e-combustíveis) e usos industriais com captura/uso de CO2 biogênico (PRZYBYLA *et al.*, 2025).

Do ponto de vista eletroquímico, observa-se no Brasil avanços significativos no processo de adaptação das tecnologias de eletrólise, tais como *Alkaline Electrolysis* (AEL), *Proton Exchange Membrane* (PEM) e *Solid Oxide Electrolysis Cell* (SOEC), aos perfis de geração elétrica variável característicos das fontes renováveis. Tais avanços concentram-se, sobretudo, na melhoria da densidade de corrente, no aumento da durabilidade dos sistemas e na redução de custos operacionais, fatores determinantes para a competitividade do hidrogênio verde em larga escala (SANTOS *et al.*, 2017). Ainda conforme os autores, destaca-se que os principais gargalos tecnológicos incluem a eficiência energética, o desenvolvimento de novos materiais catalíticos e a longevidade de membranas eletrolíticas, além de propor uma agenda de pesquisa e desenvolvimento voltada à integração com energias renováveis e à mitigação de transientes de operação.

2.2 DESAFIOS ECONÔMICOS E REGULATÓRIOS BRASILEIROS DO H2V

A adoção em larga escala do hidrogênio verde no Brasil enfrenta desafios econômicos significativos, especialmente relacionados aos custos de produção e infraestrutura. Conforme Chantre *et al.* (2022), a produção de H2V via eletrólise, embora tecnicamente viável, demanda investimentos elevados em energia renovável e eletrolisadores, tornando-o menos competitivo frente ao hidrogênio cinza, derivado de combustíveis fósseis. Além disso, Medeiros (2025) corrobora informando que mesmo com a abundância de fontes renováveis no país, como solar e eólica, o custo nivelado da energia (LCOE) precisa ser reduzido para viabilizar a competitividade do H2V, além de exigir economias de escala e avanços tecnológicos para diminuir os gastos com eletrólise em até 85%. Adicionalmente, entre os principais desafios destacam-se a necessidade de assegurar o acesso equitativo às tecnologias de produção, distribuição e armazenamento do H2V, bem como da complexidade inerente aos mecanismos de governança e aos sistemas financeiros, os quais variam de acordo com diferentes contextos econômicos e institucionais. A falta de incentivos fiscais e linhas de financiamento específicas também dificultam a atração de investimentos privados, essenciais para a expansão do setor (MARTINS *et al.*, 2024).

Do ponto de vista regulatório, a ausência de um marco legal específico para o H2V representa um entrave crítico. Embora os projetos executados no país demonstrem potencial técnico, a inexistência de normas claras sobre certificação, transporte e mistura com gás natural limita a segurança jurídica para contratos de longo prazo (CASTRO *et al.*, 2024). Ainda conforme os autores, a regulamentação atual do gás natural, por exemplo, não contempla

adequadamente a injeção de H2V na rede existente, gerando incertezas sobre responsabilidades e padrões técnicos. Além disso, Martins *et al.* (2024), afirma que a demora na aprovação de políticas nacionais, como o Programa Nacional do Hidrogênio (PNH2), retarda a criação de um mercado estruturado, colocando o Brasil em desvantagem frente a países que já avançaram em estratégias de descarbonização baseadas em H2V (OLIVEIRA, 2022). Ainda nessa linha de raciocínio, experiências internacionais mostram que a regulação transparente e incentivos fiscais são determinantes para atrair capital estrangeiro, como observado em hubs de H2V na Europa e Ásia (MEDEIROS, 2025). No contexto brasileiro, a articulação entre ministérios (Minas e Energia, Meio Ambiente e Economia) e agências reguladoras é fundamental para o estabelecimento de parâmetros técnicos e de mecanismos de rastreabilidade de carbono, assegurando a previsibilidade necessária para investimentos em larga escala (GUPTA *et al.*, 2023).

2.3 PERSPECTIVAS PARA O DESENVOLVIMENTO DO H2V NO CENÁRIO BRASILEIRO

O Brasil apresenta vantagens estruturais e territoriais para a expansão do hidrogênio verde, combinando abundância de recursos renováveis com o potencial competitivo para exportações. Maldonado *et al.*, (2024) indicam que o Brasil desponta como parceiro estratégico em potencial para países que demandam importações de hidrogênio, em especial a Alemanha. Porém, ainda existem incertezas, principalmente, relacionadas à capacidade atual da infraestrutura para viabilizar o comércio internacional de H2V e de seus derivados (e-combustíveis), conforme os autores, a conciliação das prioridades nacionais com as metas internacionais, considerando simultaneamente os desafios socioambientais, demanda um processo de análise mais aprofundada, por isso, tal processo envolve a realização de modelagens, consultas públicas e avaliações amplas de impactos nas comunidades (CASTRO, *et al.*, 2023).

Ainda nessa linha, as análises de mercado apontadas por Botelho *et al.* (2024), indicaram oportunidades de inserção do H2V produzido no Brasil em cadeias internacionais de amônia verde, aço verde e combustíveis sintéticos, desde que ancoradas em infraestrutura portuária e marcos de certificação. Além disso, suas projeções quantificaram um expressivo potencial exportador, contudo, a competitividade brasileira dependerá da queda contínua no custo produtivo da eletrólise e da expansão coordenada das energias renováveis.

No plano tecno-econômico, Pinheiro *et al.* (2025) afirma que a viabilidade da produção de hidrogênio verde está diretamente ligada à disponibilidade de recursos renováveis e a uma matriz energética diversificada. Sobre o aspecto do armazenamento de energia, conforme Mantovan *et al.* (2025), no contexto brasileiro, as termelétricas movidas por fontes não renováveis, seguem desempenhando o papel de suporte ao sistema elétrico, assegurando estabilidade diante das variações na oferta de energia. Ademais, os sistemas baseados em hidrogênio (H₂) despontam como uma alternativa promissora para o armazenamento de energia em grande escala e por períodos prolongados, atuando como instrumentos de arbitragem em momentos de instabilidade na oferta energética. Ainda sobre o assunto, Ciotta *et al.* (2023), verificaram em seu estudo, que os campos de gás offshore esgotados analisados, apresentaram capacidade para armazenar, aproximadamente, 5.483 TWh de hidrogênio, valor equivalente a cerca de dez vezes o consumo anual de eletricidade no Brasil. Esse cenário evidencia que o país pode explorar de forma estratégica seu potencial eólico offshore associado à produção de hidrogênio, fortalecendo a segurança energética do sistema elétrico nacional.

Do ponto de vista institucional, avanços regulatórios recentes elevaram a previsibilidade do setor. A promulgação do marco legal do hidrogênio de baixa emissão (Lei 14.948/2024 e regulamentações subsequentes) é destacada na literatura como um divisor de águas, ao

estabelecer diretrizes para certificação, incentivos e coordenação interministerial, ainda que a efetividade dependa de normativos infralegais e de instrumentos econômicos estáveis. Após a execução de avaliações macroeconômicas com insumo-produto, Brito *et al.* (2025) estimaram efeitos positivos de encadeamentos produtivos e de emprego, sobretudo em regiões com projetos eólicos/solares e infraestrutura portuária, mas alertam para gargalos logísticos, qualificação de mão de obra e necessidade de política industrial para manufatura de equipamentos. Em síntese, há uma janela de oportunidade para consolidar o H₂V como vetor de reindustrialização verde, condicionada à implementação regulatória e ao escalonamento coordenado de investimentos (BNDES, 2022).

3 METODOLOGIA

Este trabalho foi elaborado com base em uma revisão bibliográfica sistemática, com o objetivo de analisar as barreiras à adoção de tecnologias de hidrogênio verde no Brasil. A pesquisa foi conduzida utilizando bases de dados científicas, além de relatórios e publicações de instituições governamentais e de pesquisa no Brasil. O processo metodológico incluiu as etapas de definição do escopo, coleta de dados bibliográficos, análise qualitativa, síntese dos dados e discussão dos resultados.

Inicialmente, foram selecionados artigos científicos, relatórios técnicos, documentos de políticas públicas e estudos de caso publicados recentemente, priorizando aqueles da última década e que abordam o cenário brasileiro ou que apresentam informações relevantes para a compreensão do tema em nível global. Em seguida, os documentos coletados foram analisados qualitativamente para extrair informações sobre os avanços tecnológicos do hidrogênio verde no contexto brasileiro, bem como os desafios econômicos e regulatórios no país. Foram analisados também, documentos que envolviam oportunidades e perspectivas para o desenvolvimento do combustível no Brasil.

Por fim, as informações foram sintetizadas e organizadas de acordo com a estrutura proposta para o trabalho, permitindo a discussão dos resultados e a formulação das considerações finais. A análise buscou correlacionar os avanços tecnológicos com as barreiras existentes, propondo caminhos para a superação dos desafios e a consolidação em larga escala do hidrogênio verde como um pilar da transição energética brasileira.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presente análise demonstrou que o hidrogênio verde (H₂V) configura-se como uma alternativa estratégica para a transição energética global, diante da necessidade de redução das emissões de gases de efeito estufa e da diversificação da matriz energética. No contexto brasileiro, identificaram-se condições favoráveis para a consolidação desse vetor energético, em virtude da elevada participação de fontes renováveis na matriz elétrica, da flexibilidade proporcionada pelo sistema hidrelétrico e do potencial competitivo para inserção em mercados internacionais em expansão.

Constatou-se, entretanto, que a adoção em larga escala do H₂V no país ainda enfrenta barreiras significativas. Do ponto de vista econômico, os elevados custos associados à eletrólise e a necessidade de economias de escala comprometem sua competitividade em relação ao hidrogênio de origem fóssil. No âmbito regulatório, a ausência de normas consolidadas sobre certificação, transporte e injeção na rede de gás natural limita a previsibilidade e a segurança jurídica para investimentos de longo prazo. Tais obstáculos evidenciam a necessidade de políticas públicas consistentes, mecanismos de incentivo fiscal e instrumentos de financiamento voltados ao fortalecimento da cadeia produtiva nacional.

As perspectivas para o setor indicam que o H2V possui potencial não apenas como vetor energético, mas também como indutor de reindustrialização verde, com impactos relevantes sobre a geração de empregos, a segurança energética e a competitividade econômica. A materialização desse potencial dependerá do alinhamento entre inovação tecnológica, avanços regulatórios e planejamento estratégico de infraestrutura, de modo a assegurar a integração entre competitividade econômica, sustentabilidade ambiental e desenvolvimento social.

Em síntese, o hidrogênio verde apresenta-se como uma janela de oportunidade para o Brasil. Sua consolidação, contudo, está condicionada à superação dos gargalos identificados e à implementação de políticas públicas de longo prazo que permitam transformar as vantagens estruturais do país em liderança efetiva no cenário internacional de energias limpas.

REFERÊNCIAS

BEZERRA, F. D. **HIDROGÊNIO VERDE: NASCE UM GIGANTE NO SETOR DE ENERGIA**. Caderno Setorial ETENE. Banco do Nordeste. Ano 6. Nº 212. Dezembro. 2021.

BNDES (Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social). **Hidrogênio de baixo carbono: oportunidades para o protagonismo brasileiro na produção de energia limpa**. Rio de Janeiro. 2022.

BRITO, K. S.; BARROSO, P. D. B.; CAVALIERO, C. K. N. **The relevance of input-output analysis in public policies propositions for green hydrogen in Brazil**. International Journal of Hydrogen Energy. Vol. 145. p. 1033-1046. Julho. 2025.

BOTELHO, D. F.; MORAES, C. A.; OLIVEIRA, L. W. de. **Green hydrogen production from hydro spilled energy in Brazilian hydropower plants**. International Journal of Hydrogen Energy. Vol. 68. p. 575-585. Maio. 2024.

CASTRO, F. A. de; *et al.* **Green Hydrogen: Perspectives and Challenges in Using the Natural Gas Network in Ceará/Brazil**. Journal of Geoscience and Environment Protection. Vol. 12. N. 3. p. 70-94. Março. 2024.

CASTRO, N. de.; *et al.* **A economia do hidrogênio: transição, descarbonização e oportunidades para o Brasil**. p. 336. Ed. 1. Rio de Janeiro. 2023.

CHANTRE, C.; *et al.*: **Hydrogen economy development in Brazil: An analysis of stakeholders' perception**. Sustainable Production and Consumption. Vol. 34. p. 26-41. Novembro. 2022.

CIOTTA, M.; *et al.* **Hydrogen storage in depleted offshore gas fields in Brazil: Potential and implications for energy security**. International Journal of Hydrogen Energy. Vol. 48. Pub. 100. p. 39967-39980. Dezembro. 2023.

CNI (Confederação Nacional da Indústria). **Hidrogênio sustentável: perspectivas e potencial para a indústria brasileira**. p. 137. Brasília. 2022.

DRIEMEIER, C. E.; *et al.* **Electrolytic hydrogen in a large-scale decarbonized grid with energy reservoirs: An assessment of carbon intensity and integrity**. Applied Energy. Vol. 391. Agosto. 2025.

- FEITOSA, F. E. B.; COSTA, A. L. **Simulation and evaluation of a large-scale electrolysis plant - A case study in Pecem a Brazilian Port**. Renewable Energy. Vol. 250. Setembro. 2025.
- FERNANDES, G.; AZEVEDO, J. H. de; AYELLO, M.; GONÇALVES, F. **Panorama dos desafios do hidrogênio verde no Brasil**. FGV ENERGIA. Coluna Opinião. Janeiro. 2023.
- GARLET, T. B.; *et al.* **Unlocking Brazil's green hydrogen potential: Overcoming barriers and formulating strategies to this promising sector**. International Journal of Hydrogen Energy. Vol. 49. Par. D. p. 553-570. Janeiro. 2024.
- GOMES, L. A. A.; *et al.* **Hidrogênio verde no brasil: potencial e desafios na transição energética**. Revista Políticas Públicas & Cidades, [S. 1.], v. 13, n. 2, p. 1405. 2024
- GUPTA, R.; *et al.* **Macroeconomic analysis of a new green hydrogen industry using input-output analysis: The case of Switzerland**. Energy Policy. Vol. 183. Dezembro. 2023.
- MALDONADO, U. M.; *et al.* **Estimating Brazil's green hydrogen export potential through simulated long-term scenarios**. Energy. Vol. 333. Outubro. 2025.
- MANTOVAN, F. de. M.; *et al.* **Impact of adopting H2 storage in the Brazilian power generation: Key differences to other economies**. International Journal of Hydrogen Energy. Vol. 145. p. 519-530. Julho. 2025.
- MARTINS, P. H dos. S.; *et al.* **Brazil's New Green Hydrogen Industry: An Assessment of Its Macroeconomic Viability Through an Input-Output Approach**. Economies, 12, 333. Dezembro. 2024.
- OLIVEIRA, R. C. de. **Panorama do hidrogênio no brasil**. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. Brasília. 2022.
- PINHEIRO, F. P.; *et al.* **Techno-economic analysis of green hydrogen generation from combined wind and photovoltaic systems based on hourly temporal correlation**. International Journal of Hydrogen Energy. Vol. 97. p. 690-707. Janeiro. 2025.
- PRZYBYLA, G.; *et al.* **Unlocking the green hydrogen potential of Brazilian landfills: An in-depth techno-economic feasibility analysis and sustainable applications towards a low-carbon energy transition**. International Journal of Hydrogen Energy. Vol. 103. p. 53-63. Fevereiro. 2025.
- SANTOS, K. G. dos; *et al.* **Hydrogen production in the electrolysis of water in Brazil, a review**. Renewable and Sustainable Energy Reviews. Vol. 68. Par. 1. p. 563-571.
- STIFTUNG, H. B. **Desafios e oportunidades para o brasil com o hidrogênio verde**. [S.l.: s.n.]. p. 39. 2021.