

O HIDROGÊNIO VERDE PODE SER UMA OPORTUNIDADE PARA CONSOLIDAR O BRASIL COMO PROTAGONISTA MUNDIAL NA DESCARBONIZAÇÃO DO SETOR ENERGÉTICO

GREEN HYDROGEN CAN BE AN OPPORTUNITY TO CONSOLIDATE BRAZIL AS A WORLD PLAYER IN THE DECARBONIZATION OF THE ENERGY SECTOR

DOI: <https://doi.org/10.16891/2317-434X.v11.e3.a2023.pp3255-3259>

Andrey S. Barbosa^a

*Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN/CNEN) – Universidade de São Paulo (USP)
E-mail: andreybarbosa@usp.br

INTRODUÇÃO

Neste editorial para a Revista Interfaces, é abordado o hidrogênio verde (H2V) como futuro protagonista na descarbonização do setor energético brasileiro e mundial. O H2V é uma fonte de energia limpa que poderá substituir combustíveis de origem fóssil no setor industrial, bem como no mercado automobilístico de veículos elétricos para mitigar emissões de gases de efeito estufa (GEE). Embora em estágio inicial de produção, o Brasil tem dado os primeiros passos para se consolidar como uma referência competitiva mundial na produção de H2V. A primeira planta de H2V do país está localizada no Nordeste, estado do Ceará, especificamente no Complexo Industrial e Portuário do Pecém (CIPP), que tem capacidade de gerar 22,5 quilogramas de H2V por hora [1]. Com investimentos em torno de R\$ 41,9 milhões, o H2V oriundo do CIPP deverá movimentar cerca de 30 bilhões de dólares no Brasil até 2030, abastecendo parte da indústria local e exportando o H2V brasileiro para Europa [2]. Considerado o combustível do futuro, o hidrogênio tem chamado atenção devido sua elevada densidade de energia por unidade de massa (120 MJ/kg). Isso pode significar um poder calorífico quase três vezes superior comparado ao gásóleo (gasolina ou gás natural, por exemplo), além disso, sua queima direta não gera CO₂. Entretanto, para ser considerado verde, o hidrogênio deve ser obtido por processos que utilizem energia renovável. A eletrólise é um processo eletroquímico promissor capaz de quebrar moléculas de água em hidrogênio (H₂) e oxigênio (O₂) através de uma corrente elétrica [3]. Quando

a corrente elétrica utilizada é fornecida por fontes renováveis como solar, eólica, biomassa entre outras, o processo tem emissão líquida de GEEs zero, portanto, é considerado limpo. Esse fato coloca o Brasil na vanguarda da corrida mundial pelo H2V, pois o país obtém cerca de 88% de sua matriz energética a partir de fontes renováveis [4]. Um ponto diferencial muito importante em relação a países que têm uma matriz energética dependente de combustíveis de origem fóssil. Com recursos naturais disponíveis, o Brasil apresenta um cenário favorável para se consolidar como um grande produtor de H2V, aproveitando a energia solar e eólica no Nordeste, além da variedade de biomassas, como a cana-de-açúcar, para produção de etanol. Embora o Brasil forneça condições favoráveis ao setor, desafios relacionados a tecnologia, produção, infraestrutura, distribuição e regulamentação do setor ainda são fatores que precisam ser superados. Aqui, é fornecido uma introdução sobre temas relacionado ao H2V, desde sua classificação, produção, regulamentação, até uma reflexão do potencial brasileiro para o setor.

Classificação, obtenção e potencial de produção de H₂

O hidrogênio é o mais simples e abundante elemento químico encontrado no Universo. Está presente em diversos compostos, desde os mais simples, como a água, até substâncias complexas, como combustíveis fósseis, biomassas e biomoléculas. A forma molecular H₂ é de forte interesse para o setor energético, pois entrega alta densidade de energia considerando sua pequena massa. O H₂ não é propriamente um combustível, mas sim

um vetor energético, isto é, trata-se de um componente derivado de um combustível preexistente que transporta energia [5]. Isso significa que esse gás pode ser obtido por diversas fontes (gás natural, petróleo, amônia, etanol, entre outros) e diferentes processos (reforma a vapor, eletrólise, e bioconversão, por exemplo). Assim, pode ser considerado uma fonte de energia democrática, uma vez que não está limitado a uma região específica do mundo. Por exemplo, ao contrário do lítio utilizado em baterias, que está concentrado na América do Sul, ou do gásóleo (petróleo e gás natural) centralizado nos países participantes da Opep+ (Organização de Países Exportadores de Petróleo).

A contribuição atual do H_2 para a matriz energética mundial ainda é tímida. Quase todo o hidrogênio produzido representa pouco mais de 830 milhões de toneladas por ano, sendo obtido principalmente da reforma de combustíveis de origem fóssil [6]. A reforma é um processo termoquímico, que utiliza alta temperatura, pressão e catalisadores para obter um produto conhecido como gás de síntese, que é uma mistura de CO e H_2 [7]. A mistura gasosa passa por um processo posterior para isolar o hidrogênio, que é o produto de maior interesse. Esse H_2 é classificado como cinza, diferente do H_2 obtido pela eletrólise, uma vez que o gás natural é o combustível fóssil utilizado. A escala de cores é uma classificação que associa o hidrogênio com base em sua tecnologia de produção, fonte de energia e impacto ambiental [8]. Embora a reforma seja um processo eficiente e amplamente utilizado, é um processo de custo alto e emissor de carbono. O H_2 da reforma abastece principalmente a indústria química para o refino de petróleo, a produção de fertilizantes, obtenção de produtos siderúrgicos, entre outros [8].

O H_2V gerado a partir de processos que utilizam fontes de energia sustentáveis, como a eletrólise da água, é uma alternativa ambiciosa. Segundo a Agência Internacional de Energias Renováveis (IRENA, do inglês, *International Renewable Energy Agency*), o principal desafio para consolidar a oferta global de H_2V é a necessidade de maturidade tecnológica, alto custo de produção e logística. Embora a eletrólise seja uma boa alternativa à reforma, o processo eletroquímico sofre com limitações relacionadas aos custos e melhoramento tecnológico [9]. Eletrolisadores baseados em eletrólito líquido alcalino (AWE, do inglês, *Alkaline Water Electrolysis*) é uma tecnologia já amadurecida para a produção de H_2V . Esse tipo de equipamento está disponível para venda no mercado, como por exemplo, a empresa norueguesa *Nel Hydrogen* que fornece um AWE com capacidade de geração de até 20 MW. Apesar da alta

eficiência e elevado grau de pureza do produto, esse tipo de tecnologia sofre limitações como alta concentração de solução alcalina, remoção de subprodutos, e uso de catalisadores nobres. É óbvio que essa abordagem para a eletrólise não é a única disponível. Existem outros tipos de reatores eletrolíticos que apresentam avanços tecnológicos como os eletrolisadores baseados em membranas de troca protônica (PEMWE, do inglês, *Proton Exchange Membrane Water Electrolysis*), membranas de troca aniônica (AEMWE, do inglês, *Anion Exchange Membrane Water Electrolysis*) e membranas de óxido cerâmico (SOWE, do inglês, *Solid Oxide Water Electrolysis*) [10]. Isso mostra que o avanço tecnológico da área é um tema que desperta interesse no campo da pesquisa, desenvolvimento e inovação.

Precisamos enxergar o hidrogênio verde como uma solução energética para descarbonizar o setor energético global, há tecnologias disponíveis e as projeções são animadoras. Segundo a *Hydrogen Council*, há uma expectativa de 520 fabricas de H_2 em todo o mundo, que até 2050 fornecerá 600 milhões de toneladas por ano. Isso supre 22% do mercado energético mundial, permitindo uma redução de 20% nas emissões de GEEs. Por outro lado, produzir H_2V ainda tem custo elevado. Segundo a Agência Internacional de Energia (IEA, do inglês, *International Energy Agency*), o quilo de H_2V custa entre 3 e 8 dólares, esse valor depende da fonte de energia utilizada e do local de fabricação. Em contrapartida, o H_2 cinza da reforma custa cerca de 1 dólar. A IRENA antecipa que, devido à crescente disponibilidade de energias renováveis e ao aumento da escala de produção, o H_2V se tornará competitivo até 2030. Certamente, essas projeções serão consolidadas com investimentos sólido, demanda, desenvolvimento tecnológico entre outros.

Uma infraestrutura nacional eficaz é necessária para distribuir o H_2V

O hidrogênio ganhará cada vez mais espaço na transição energética de combustíveis fósseis para combustíveis de emissão líquida zero de carbono. Para tal, são necessárias políticas que criem infraestrutura nacional para transportar H_2 do ponto de fabricação até estações de reabastecimento para o consumidor final. Isso porque, o custo do produto é fortemente influenciado pela distância em que a produção ocorre até o ponto de uso [11]. Uma alternativa é produzir H_2 em larga escala de forma centralizada para baixar os custos devido a economia de escala. Por outro lado, os custos de entrega são elevados, uma vez que instalações de grande porte geralmente se

encontram longe dos principais centros urbanos [12]. O ponto chave é diversificação do sistema de distribuição, assim, é necessária uma infraestrutura nacional multissegmentada com gasodutos, transportes rodoviários, ferrovias, hidrovias e outros [12].

Entre a produção e a distribuição existem formas distintas pelas quais o H_2 pode ser armazenado. Estratégias de armazenamento de hidrogênio que variam de métodos físicos como a compressão ou liquefação, passando por compostos líquidos que apresentam hidrogênio em sua composição, ou materiais sólidos em que o H_2 pode ser armazenado em sua estrutura [13]. É claro que cada tipo de método pode ser utilizado de acordo com as necessidades da demanda. Assim, é possível considerar armazenamento para sistemas estacionários de fornecimento de energia ou veiculares.

Os sistemas estacionários que consomem hidrogênio têm requisitos menos rigorosos quando comparado ao veicular, principalmente em termos de segurança para o consumidor final. Tais sistemas podem ocupar maiores áreas, operar em temperaturas altas e compensar tempos de reabastecimento mais lentos com grande volume de armazenamento. Além disso, pode ser abastecido por compostos sólidos ou líquidos que são constituídos por hidrogênio. Por exemplo, o etanol emerge como um candidato atraente para ser utilizado como um combustível líquido para transportar H_2 . Esse fato é de extrema relevância para o cenário brasileiro, uma vez que o etanol produzido no Brasil é derivado do processamento da cana-de-açúcar, a qual está amplamente distribuída pelo país. Por exemplo, a safra de 2022/23 de etanol atingiu a marca histórica de 610 milhões de toneladas [15]. Isso destaca a posição de liderança do Brasil como o maior produtor mundial de etanol de cana-de-açúcar, sendo possível devido à sua infraestrutura robusta para o processamento e distribuição do etanol. A infraestrutura nacional de etanol foi iniciada em 1975 com o Programa Nacional do Álcool (Proálcool), que impulsionou a produção de bioenergia no país. Hoje, o Brasil conta com uma rede nacional consolidada de distribuição e reabastecimento com cerca de 43 mil postos de combustíveis com etanol disponível [16]. A ideia é simples, aproveitar a infraestrutura nacional de etanol para implementar sistemas de reforma de etanol, substituindo o gás natural, a fim de produzir hidrogênio de forma sustentável e com baixa emissão de carbono. Dessa forma, torna-se viável disponibilizar hidrogênio para reabastecer veículos que tenham substituído o motor a combustão convencional por tecnologias baseadas em células a combustível de hidrogênio. Uma célula a combustível é um dispositivo eletroquímico de alta eficiência capaz de

converter H_2 e O_2 em energia, calor e água. Esse tipo de tecnologia para carros é uma realidade. Segundo a IEA, existem cerca de 52 mil carros elétricos baseados em célula a combustível, que consomem H_2 , em todo o mundo.

Regulamentação do setor é o passo crucial para consolidação do H_2

O mercado de hidrogênio necessita de especificações urgentes, especialmente no Brasil. Complexos fatores, como produção, transporte, distribuição e normas técnicas que estabeleçam de maneira clara os padrões de segurança, qualidade e eficiência, são fundamentais e demandam uma regulamentação para proporcionar segurança ao setor. Diante da complexidade e urgência associadas ao tema, o Brasil corre o risco de ficar para trás devido à ausência de uma regulamentação clara para o setor. O projeto de lei sobre o marco regulatório para o hidrogênio verde do Brasil tem encontrado dificuldades para avançar no congresso nacional [2]. A inércia para a regulamentação do setor poderá comprometer o protagonismo do país, especialmente, considerando o curto espaço de tempo em que o hidrogênio precisará estar disponível para frear o aquecimento global e cumprir as obrigações do Acordo de Paris limitando o aquecimento global a 1,5 °C acima dos níveis pré-industriais.

Em agosto de 2023, o Governo Federal do Brasil divulgou sua atualização da proposta para o Programa Nacional do Hidrogênio (PNH2), que delineia a construção de um arcabouço regulatório visando o progresso da indústria do H_2 [17]. Uma das principais iniciativas consiste em ampliar os investimentos anuais em pesquisa, desenvolvimento e inovação em hidrogênio de baixa emissão de carbono. Além disso, o investimento, que foi de R\$ 29 milhões em 2020, será aumentado progressivamente para R\$ 200 milhões por ano até 2025. O PNH2 define três metas com prazos específicos bem estabelecidos: até 2025, plantas piloto de hidrogênio com baixa emissão de carbono deverá ser implementadas em todas as regiões do país; à médio prazo, até 2030, o Brasil deverá ser consolidado como o principal produtor mundial competitivo de H_2 com baixa emissão de carbono; finalmente, até 2035, consolidar *hubs* de hidrogênio com baixa emissão de carbono em todas as regiões do território brasileiro [17]. Isso significa um avanço importante, entretanto, um ponto negativo é que o PNH2 não estabelece metas para aprimorar a legislação ao licenciamento ambiental para projetos vinculados ao H_2V .

O ano de 2023 terminou com uma concessão importante para o setor, em dezembro, a Comissão

Especial dedicada à Discussão de Políticas Públicas sobre Hidrogênio Verde no Senado Federal aprovou o projeto de lei para o setor. O Projeto de Lei 5.816/2023 estabelece bases legais jurídicas para o setor, além disso, introduz o Programa de Desenvolvimento do Hidrogênio de Baixo Carbono (PHBC). O programa servirá como meio de financiar a nova política, impulsionando a transição energética e fomentando o desenvolvimento sustentável. O projeto aprovado pela Comissão Especial autoriza o governo a criar um sistema de certificação para empresas produtoras de diferentes tipos de hidrogênio baseado em critérios internacionais. Além disso, direciona que a produção de hidrogênio de baixo carbono ficará sob a responsabilidade da Agência Nacional de Petróleo (ANP), enquanto a produção via eletrólise da água será regulamentada pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Por outro lado, atividades relacionadas ao carregamento, processamento, tratamento, importação, exportação, armazenagem, estocagem, acondicionamento, transporte, transferência, distribuição, revenda e comercialização de H₂ podem ser realizadas por empresas nacionais, desde que sujeitas à autorização da ANP. A aprovação do Projeto de Lei na comissão é um passo fundamental para a regulamentação nacional, mas ainda está longe do ideal, já que o projeto precisa ser sancionado. A corrida pelo hidrogênio está em pleno curso hoje, outros países concorrentes do Brasil já apresentam iniciativas de regulamentação do H₂V bastante consolidadas (Chile, Canadá, China, são exemplos). Em breve, os combustíveis fósseis deverão ser reduzidos progressivamente até

desaparecer. Não resta dúvidas que essa é uma questão de quando, não de se ocorrerá.

CONCLUSÃO

Em conclusão, o hidrogênio emerge como protagonista na transição energética, representando uma alternativa crucial aos combustíveis fósseis. No entanto, para viabilizar sua integração efetiva, é imperativo estabelecer políticas que fomentem a criação de uma infraestrutura nacional abrangente, considerando os desafios de produção, logísticos e custos associados à distribuição. Especialmente no contexto do Brasil, a utilização do etanol como veículo fornecedor de H₂ destaca-se como uma solução promissora e rápida, dada a robustez da infraestrutura nacional de etanol existente. Isso se evidencia, uma vez que há um longo caminho para a implementação da tecnologia de eletrólise em todo o Brasil. A convergência desses elementos impulsiona a perspectiva de um futuro em que o hidrogênio desempenha um papel fundamental na matriz energética, contribuindo para a descarbonização e a sustentabilidade global. Contudo, para assegurar uma futura posição de liderança na produção de H₂V, o Brasil deverá aprimorar sua legislação, investir em pesquisa, desenvolvimento e inovação, e integrar tecnologias sustentáveis. Assim, é necessário que governos, indústrias e instituições invistam de forma consistente em pesquisa, desenvolvimento e infraestrutura, a fim de acelerar a transição para uma economia do hidrogênio sustentável e eficiente.

REFERÊNCIAS

[1] Revista Fapesp, Brazil prepares to start producing green hydrogen. Disponível em: <https://revistapesquisa.fapesp.br/en/brazil-prepares-to-start-producing-green-hydrogen/>. Acessado em 08 de janeiro de 2024

[2] Netto, Victoria. Projetos de hidrogênio verde avançam no Brasil, mas sem regulamentação, Climatetracker, outubro de 2023, Disponível em: <https://climatetrackerlatam.org/historias/projetos-de-hidrogenio-verde-avancam-no-brasil-mas-sem-regulamentacao/>. Acessado em 07 de janeiro de 2024.

[3] Carmo M, Fritz DL, Mergel J, Stolten D. A comprehensive review on PEM water electrolysis. Int J Hydrogen Energy 2013; 38: 4901–34. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.01.151>. Acessado em 08 de janeiro de 2024.

[4] Ministério de Minas e Energia do Brasil, Empresa de Pesquisa Energética, Balanço Nacional de Energia de 2023. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-748/topico-687/BEN2023.pdf>. Acessado em 08 de janeiro de 2024.

[5] Abdin Z, Zafaranloo A, Rafiee A, Mérida W, Lipiński W, Khalilpour KR. Hydrogen as an energy vector. Renew Sustain Energy Rev 2020; 120. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109620>. Acessado em 08 de janeiro de 2024.

[6] International Energy Agency (IEA), 2019. Disponível em: https://www.hydrogenexpo.com/media/9370/the_future_of_hydrogen_iea.pdf. Acessado em 05 de janeiro de 2024.

- [7] Pilavachi PA, Chatzipanagi AI, Spyropoulou AI. Evaluation of hydrogen production methods using the Analytic Hierarchy Process. *Int J Hydrogen Energy* 2009; 34: 5294–303. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.04.026>. Acessado em 08 de Janeiro de 2024.
- [8] Kumar SS, Lim H. An overview of water electrolysis technologies for green hydrogen production. *Energy Reports* 2022; 8: 13793–813. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.10.127>. Acessado em 08 de janeiro de 2024.
- [9] Grigoriev SA, Fateev VN, Bessarabov DG, Millet P. Current status, research trends, and challenges in water electrolysis science and technology. *Int J Hydrogen Energy* 2020; 45: 26036–58. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.03.109>. Acessado em 08 de Janeiro de 2024.
- [10] Niblett D, Delpisheh M, Ramakrishnan S, Mamlouk M. Review of next generation hydrogen production from offshore wind using water electrolysis. *J Power Sources* 2024; 592: 233904. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2023.233904>. Acessado em 08 de janeiro de 2024.
- [11] Abdalla AM, Hossain S, Nis OB, Azad AT. Hydrogen production, storage, transportation and key challenges with applications: A review 2018; 165: 602–27. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.03.088>. Acessado em 08 de janeiro de 2024.
- [12] Kim JW, Boo KJ, Cho JH, Moon I. Key challenges in the development of an infrastructure for hydrogen production, delivery, storage, and use. *Advances in Hydrogen Production, Storage and Distribution*, 2014; 3-31. Disponível em <https://doi.org/10.1533/9780857097736.1.3>. Acessado em 06 de janeiro de 2023.
- [13] Tang D, Tan G, Li G, Liang J, Masood S, Bahadur A, et al. State-of-the-art hydrogen generation techniques and storage methods: A critical review. *J Energy Storage* 2023; 64: 107196. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.107196>. Acessado em 08 de janeiro de 2024.
- [14] Companhia Nacional de Abastecimento (Conab), A produção de cana chega a 610,1 milhões de toneladas na safra 2022/23 com a melhora na produtividade nas lavouras, 2023. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/ultimas-noticias/4977-producao-de-cana-chega-a-610-1-milhoes-de-toneladas-na-safra-2022-23-com-melhora-na-produtividade-nas-lavouras>. Acessado em 08 de janeiro de 2024.
- [15] Agência Senado, Especialistas dizem que Brasil deverá se tornar o maior produtor mundial de hidrogênio verde, outubro de 2023. Disponível em: <https://www12.senado.leg.br/radio/1/noticia/2023/10/30/especialistas-dizem-que-brasil-devera-se-tornar-o-maior-produtor-mundial-de-hidrogenio-verde>. Acessado em 08 de janeiro de 2024.
- [16] Ministério de Minas e Energia, Plano Nacional de Hidrogênio Trienal, 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/PlanodeTrabalhoTrienalPNH2.pdf>. Acessado em 08 de janeiro de 2023.
- [17] Agência Senado, Comissão do hidrogênio verde aprova marco legal texto segue para a câmara, dezembro de 2023. Disponível em: <https://www12.senado.leg.br/noticias/materias/2023/12/14/comissao-do-hidrogenio-verde-aprova-marco-legal-texto-segue-para-a-camara>. Acessado em 02 de janeiro de 2023.