



O MERCADO DO HIDROGÊNIO VERDE E SUAS OPORTUNIDADES

REDES INTELIGENTES DE ENERGIA E INFRAESTRUTURA PARA MOBILIDADE ELÉTRICA

Mariana de Oliveira Scherner, estudante de graduação de engenharia de controle e automação no UNISENAI Jaraguá do Sul-SC, orientada por Edenilson Bueno da Rocha, professor da graduação de engenharia de controle e automação no UNISENAI Jaraguá do Sul-SC.

mariana_scherner@estudante.sc.senai.br

RESUMO

Este trabalho apresentou uma análise abrangente do mercado de hidrogênio verde, destacando sua importância na transição energética global. A justificativa baseou-se na necessidade de compreender o crescimento desse mercado em relação aos avanços tecnológicos e políticas favoráveis. Os objetivos incluíram revisar literatura científica e dados de mercado, analisar estatísticas de produção e consumo, e modelar cenários de crescimento. Métodos utilizados envolveram revisão de publicações acadêmicas e relatórios governamentais, análise de dados secundários e modelagem de cenários. Os resultados revelaram um cenário promissor de expansão do mercado de hidrogênio verde, com projeções indicando aumento significativo na produção e adoção em diversos setores. A análise SWOT identificou pontos fortes, como baixas emissões, e desafios, como custos e infraestrutura. Concluiu-se que políticas mais robustas e investimentos direcionados são essenciais para aproveitar o potencial desse setor. Em suma, o estudo ressaltou o papel crucial do hidrogênio verde na descarbonização global e na mitigação das mudanças climáticas, destacando a necessidade de colaboração entre governos, indústria e academia para impulsionar uma transição para uma economia de baixo carbono.

Palavras-chave: Transição energética; mercado de hidrogênio verde; descarbonização; economia de baixo carbono.



INTRODUÇÃO

A transição para fontes de energia mais limpas e sustentáveis é um objetivo estratégico fundamental para muitos países em todo o mundo, impulsionado pela necessidade urgente de descarbonizar as economias e cumprir as metas de redução de emissões estabelecidas no Acordo de Paris de 2015. Nesse contexto, o hidrogênio tem emergido como um componente-chave. Quando produzido a partir de fontes renováveis, como a energia solar ou eólica, o hidrogênio é frequentemente rotulado como "verde", "sustentável" ou "renovável". Sua versatilidade como vetor energético, sem emissões diretas de gases de efeito estufa, o torna especialmente atrativo para impulsionar a transição energética global (CASTRO et al., 2021).

No âmbito nacional, o hidrogênio oferece oportunidades significativas para otimizar o sistema elétrico, equilibrando a demanda e a oferta de energia. A matriz elétrica do Brasil, assim como a de muitos outros países, está passando por mudanças substanciais com a integração crescente de fontes intermitentes, como solar e eólica, que introduzem complexidades adicionais na gestão do sistema. O hidrogênio, gerado por meio de tecnologias como eletrolisadores, pode desempenhar um papel crucial na absorção de excessos de energia gerada em períodos de alta produção, como em dias ensolarados com muita geração solar. Da mesma forma, em momentos de alta demanda sem correspondente geração suficiente, o hidrogênio pode ser usado para gerar eletricidade por meio de células de combustível, contribuindo para a estabilidade e flexibilidade do sistema energético (CASTRO et al., 2021).

Entretanto, apesar do potencial do hidrogênio como uma solução energética versátil e limpa, enfrenta desafios significativos em relação ao seu manejo e eficiência. Sua baixa densidade, pontos de fusão e ebulição, além de suas características gasosas e inodoras sob condições normais, apresentam obstáculos técnicos para o armazenamento, transporte e aplicação prática em larga escala. Além disso, a eficiência energética da conversão eletrolítica do hidrogênio, embora promissora, ainda é inferior à de sistemas de armazenamento de energia mais estabelecidos, como as baterias (BESS), evidenciando a necessidade de avanços tecnológicos e estratégias de otimização (LIMA et al., 2021).

Neste contexto, este trabalho busca analisar de forma mais detalhada o papel do hidrogênio na transição energética, identificando seus desafios e oportunidades específicos para o contexto nacional. Os objetivos principais incluem investigar as tecnologias emergentes relacionadas ao hidrogênio, avaliar seu impacto potencial no sistema elétrico brasileiro e propor estratégias para



superar as barreiras identificadas, visando contribuir para uma transição energética mais sustentável e eficiente.

METODOLOGIA

Foi realizada uma extensa revisão da literatura científica e de relatórios de mercado sobre o hidrogênio verde, incluindo análises de publicações acadêmicas, relatórios governamentais e documentos de organizações como a IEA e o Green Hydrogen Coalition. Dados secundários foram coletados e analisados, incluindo estatísticas de produção e consumo em diferentes regiões, utilizando fontes confiáveis como bancos de dados de energia e relatórios especializados. Modelos de cenários foram empregados para projetar trajetórias de crescimento e adoção do hidrogênio verde, com análises de custos e competitividade. Uma análise SWOT identificou os pontos fortes, fraquezas, oportunidades e ameaças do mercado, contribuindo para delineamento de fatores críticos de sucesso e desafios a serem enfrentados. Essa metodologia integrada permitiu uma análise abrangente e fundamentada, oferecendo insights valiosos para stakeholders e tomadores de decisão neste setor dinâmico.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

O hidrogênio verde é visto como uma solução fundamental para reduzir as emissões de gases de efeito estufa. As tecnologias Power-to-X (PtX) convertem eletricidade renovável em energia química, permitindo diversas aplicações. Setores como cimento, mineração, siderurgia, vidros, residencial e transporte apresentam alto potencial para substituir insumos por hidrogênio verde.

O hidrogênio possui várias aplicações não energéticas, como refino de óleo, produção de amônia, agentes redutores, hidrogenação de gordura e refrigeração.

A demanda global por hidrogênio triplicou desde 1975, impulsionada por setores como refino de óleo e fertilizantes.

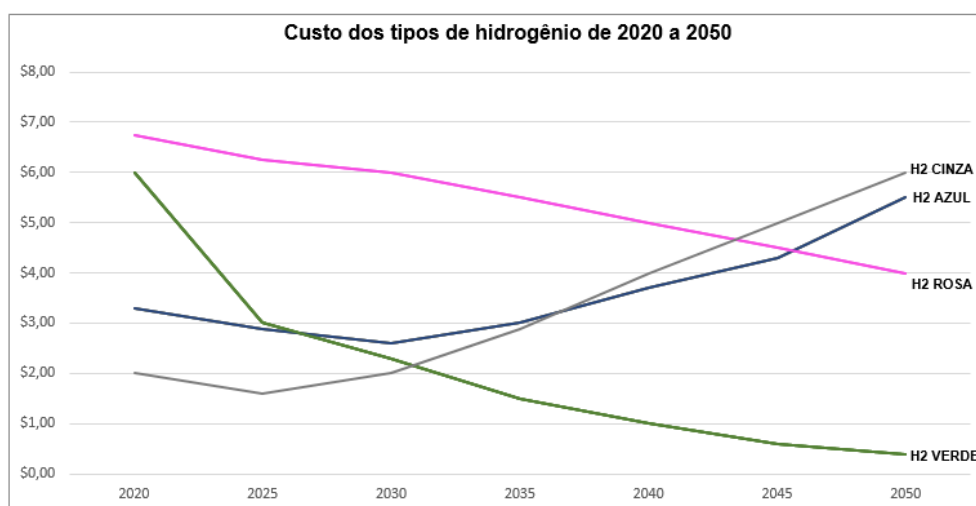
Os investimentos em hidrogênio na Europa, principalmente em capacidades renováveis, podem totalizar €2,2 trilhões até 2050. Globalmente, o mercado de hidrogênio verde pode alcançar €10 trilhões em 2050. O Brasil está buscando se destacar nesse mercado com parcerias e projetos piloto enfatizando o uso de fontes renováveis.

Os custos do hidrogênio variam significativamente: em 2022, o hidrogênio verde custa cerca de US\$6/kg, mas precisa chegar a US\$3/kg para ser competitivo. Segundo a IRENA, o



hidrogênio será competitivo em países com eletricidade a US\$30/MWh até 2030. A tendência de custos até 2050 mostra uma queda significativa para os demais tipos de hidrogênio, conforme figura 1.

Figura 1- Custo dos tipos de hidrogênio de 2020 a 2050.



Fonte: MORGAN, ReTHINK energy (2021). Elaboração autoral.

Existe uma tendência que os polos de produção de hidrogênio sustentável surjam em regiões costeiras, devido à proximidade dos portos, as demandas tem mostrado que os equipamentos para o processo de produção de H2 devam ser apropriados para instalação em ambientes salinos e abrigados em eletrocentros ou contêineres assim como são abrigados os eletrolisadores.

Conforme o Hydrogen Council (2020), 18% da energia mundial consumida em 2050 terá como fonte o hidrogênio, o que trará uma redução anual de 6Gt de emissões de CO2 e outros poluentes do ar. O desenvolvimento econômico do futuro é compreendido de uma forma sustentável, o que traria uma receita de USD 2,5 trilhões por ano e empregaria 30 milhões de pessoas pelo mundo.

Países como a Alemanha, Austrália, Espanha, Portugal, Noruega, França representavam em 2020 a parte de maior interesse em hidrogênio, desenvolvendo estratégias nacionais e ações divulgadas. Ainda, com grandes matrizes energéticas provindas de energia renovável, dentre aqueles que pretendem realizar exportação como meio de alavancar o crescimento econômico, salientam-se Espanha, Ucrânia, Rússia, Austrália, Marrocos e Chile. Os países asiáticos, Coreia do Sul, China e Japão traçam planos diretamente para o setor de transportes no geral, amônia



verde, hidrogênio líquido (LH2) e transporte de hidrogênio verde líquido (LOHC). (LIMA et al., 2021).

Como na maioria das cadeias de produção, a proximidade da planta produtiva com seus fornecedores de insumos, bem como com sua logística de expedição, é fator diferencial na busca da competitividade. Assim, no Brasil os projetos de hidrogênio sustentável têm se situado, em sua maioria, em regiões que conciliam a presença de geração de energia renovável como eólica e solar com a proximidade de canais de exportação como os portos.

A seguir serão detalhados alguns projetos relacionados a soluções em tecnologias de hidrogênio realizados no Brasil, tanto no contexto de programas de P&D quanto em aplicações para produção em escala.

Projeto Pecém H2V: Focado em desenvolver conhecimento e experiência na cadeia de valor do hidrogênio verde. O projeto inclui um roadmap para escalabilidade da produção, um projeto piloto com usina solar e eletrolisador de última geração, e a gestão da RISE (Rede de Inovação do Setor Elétrico).

Projeto Unidade Piloto de Hidrogênio na Usina Hidrelétrica de Itaipu Binacional: Iniciado em 2011, visa utilizar água excedente do reservatório para produzir hidrogênio, com uma célula a combustível de 6 kW e inversores para alimentar luminárias.

Projeto de Hidrogênio da FURNAS Centrais Elétricas S/A: Desenvolvimento de sinergia entre fontes hidrelétricas e solares com armazenamento de energia em sistemas de hidrogênio. Investimento de cerca de R\$ 44,6 milhões, com instalação de painéis fotovoltaicos e uso do hidrogênio na geração e cogeração.

Projeto Armazenamento de Energia da Companhia Energética de São Paulo (CESP): Utilização de eletrólise para produzir hidrogênio verde, armazenado para períodos de seca e alta demanda. O projeto inclui um sistema completo de armazenamento de energia elétrica com eletrolisador, tanques pressurizados, pilha a combustível e uma planta solar fotovoltaica.

Além desses projetos de PD&I, há investimentos em escala comercial no Brasil. Empresas como Fortescue Future Industries, Neuman & Esser (Hytron), Unigel e Porto do Açu estão realizando investimentos significativos em produção de hidrogênio verde, amônia verde e outras tecnologias relacionadas. Essas iniciativas envolvem parcerias estratégicas e



demonstram o potencial do Brasil no mercado de hidrogênio verde, com atração de investimentos internacionais.

O mercado global de hidrogênio, estimado em US\$ 110 a US\$ 136 bilhões em 2019, é predominantemente não energético, utilizado em fertilizantes, indústria alimentícia e derivados de petróleo. Prevê-se um crescimento expressivo nos próximos anos, podendo atingir US\$ 200 bilhões, impulsionado pela necessidade de descarbonização da economia global para cumprir as metas do Acordo de Paris até 2050. (EPE, 2021).

No mercado global, diversos projetos de grande escala estão em andamento para produção de hidrogênio verde, incluindo o Asian Renewable Energy Hub na Austrália, o NorthH2 na Holanda, o AquaVentus na Alemanha, o Helios Green Fuels na Arábia Saudita, entre outros. O Chile também tem planos ambiciosos para se tornar um dos principais exportadores de hidrogênio verde. No Brasil, projetos como o BaseOne no Porto de Pecém, com apoio de múltiplos países, visam produzir 1,3 milhões de toneladas de hidrogênio verde por ano para exportação.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O mercado está em rápida expansão, impulsionado por avanços tecnológicos e políticas favoráveis. A análise revelou uma perspectiva otimista de crescimento, com projeções indicando um aumento significativo na produção e adoção do hidrogênio verde em diversos setores. A modelagem de cenários identificou oportunidades de investimento e riscos associados à competitividade com outras fontes de energia. A análise SWOT destacou os pontos fortes, como baixas emissões e potencial de descarbonização, além de desafios como custos e infraestrutura. As conclusões apontam para a necessidade de políticas mais robustas e investimentos direcionados para alavancar o potencial do hidrogênio verde. A colaboração entre governos, indústria e academia será essencial para acelerar a transição para uma economia de baixo carbono. Em suma, o hidrogênio verde tem o potencial de desempenhar um papel crucial na descarbonização global e na mitigação das mudanças climáticas, abrindo caminho para um futuro mais sustentável e resiliente.



REFERÊNCIAS

AHK BRASIL (Câmara de Comércio e Indústria Brasil-Alemanha). 2º Congresso Brasil-Alemanha de Hidrogênio Verde. *In*: HUBNER, Daniel Hubner, Daniel Gabriel Lopes, Paulo Avarenga *et al.* **2º Congresso Brasil-Alemanha de Hidrogênio Verde**. São Paulo: AHK Brasil, 28 out. 2021. Disponível em: www.youtube.com/watch?v=xN42Qh1Btto. Acesso em: 28 set. 2023.

AHK RIO DE JANEIRO (Câmara de Comércio e Indústria Brasil-Alemanha). Green Hydrogen Application Summit. *In*: PINKOWSKI, Ludmila Nascimento, Titus Schaar, Renata Ferrari *et al.* **Green Hydrogen Application Summit – ao vivo**. Rio de Janeiro: AHK Brasil, 19 out. 2022. Disponível em: www.youtube.com/watch?v=xN42Qh1Btto. Acesso em: 18 out. 2023.

AQUAVENTUS FÖRDERVEREIN E.V. (Alemanha). **Green Hydrogen**: AquaVentus Vision. [S. l.], 2022. Disponível em: www.aquaventus.org/en/. Acesso em: 30 set. 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PEQUENAS CENTRAIS HIDRELÉTRICAS E CENTRAIS GERADORAS HIDRELÉTRICAS (ABRAPCH). Itaipu aprova testes de unidade piloto de hidrogênio. **Imprensa - Abrapch**, p. 1-1, 18 fev. 2016. Disponível em: <https://www.abrapch.org.br/2016/02/itaipu-aprova-testes-de-unidade-piloto-de-hidrogenio/>. Acesso em: 7 out. 2023.

BNEF (2021, apud TENGLER (2021)). **1H 2021 Hydrogen Levelized Cost Update**. Disponível em: https://www.linkedin.com/posts/martin-tengler-25701a29_1h-2021-hydrogen-levelized-cost-update-activity-6785521378348167168-DmJB/. Acesso em: 10 out. 2023.

CASTRO, Nivalde; CHAVES, Ana e DORES, Adely. **O Brasil na Transição Energética para o Hidrogênio Verde**. Valor Econômico, Rio de Janeiro, 2021. Disponível em: <https://valor.globo.com/opiniao/coluna/o-brasil-na-transicao-energetica-para-o-hidrogenioverde.ghhtml>. Acesso em: 20 set. 2022.

CHAGAS, Celso. Neuman & Esser investirá R\$ 45 milhões em máquinas de geração de hidrogênio verde: Com filial instalada em Belo Horizonte, a empresa alemã vai fabricar os geradores através de eletrólise e reformadores de etanol e biometano. **Energia Hoje**, [S. l.], p. 1, 25 abr. 2022. Disponível em: energiahoje.editorabrasilenergia.com.br/neuman-esser-investira-r-45-milhoes-em-maquinas-de-geracao-de-hidrogenio-verde/. Acesso em: 7 out. 2023.

EDP BRASIL. **P&D Pecém H2V**: Desenvolvimento de Roadmap e Projeto Piloto de H2 no Complexo Termelétrico do Pecém. [S. l.]: EDP, setembro 2021. Disponível em: <https://brasil.edp.com/pt-br/pd-pecem-h2v>. Acesso em: 25 out. 2023.

ENERGIX. **Global Market Access**: Dispatchable Green Energy Markets. 2022. 1 Figura. Disponível em: <https://www.energix.energy/>. Acesso em: 28 set. 2023.



FURNAS, Imprensa. Geração de hidrogênio: FURNAS inicia geração de hidrogênio pela primeira na sua história. **Iniciativa é parte de projeto de P&D de geração e armazenamento de energia desenvolvido na área da Usina de Itumbiara**, Rio de Janeiro, 15 mar. 2021. Disponível em: www.furnas.com.br/subsecao/522. Acesso em: 29 set. 2023.

MINISTERIO DA ENERGIA DO CHILE, GOBIERNO DE CHILE (Chile, Santiago). Ministerio de Energía. Marzo, 2022. **Hidrogeno verde un proyecto país**, Alameda 1449, Edificio Santiago DowntownII, Piso 13, p. 04-14, março 2022. Disponível em: www.energia.gob.cl/documentos/hidrogeno-verde-un-proyecto-pais. Acesso em: 16 set. 2023.

GOVERNMENT OF WESTERN AUSTRALIA. Kimberley Development Comission. Asian Renewable Energy Hub. **HOME**, [s. l.], 30 mar. 2022. Disponível em: kdc.wa.gov.au/asian-renewable-energy-hub/. Acesso em: 30 set. 2023.

GOVERNO FEDERAL MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA MME (Brasília – DF). EPE- Empresa de pesquisa energética. Nota Técnica. **Bases para a consolidação da estratégia brasileira do hidrogênio**: Panorama do mercado do hidrogênio, v. rev01, n. No EPE-DEA-NT-003/2021, p. 2-10, 21 jun. 2021. Disponível em: www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/nota-tecnica-bases-para-a-consolidacao-da-estrategia-brasileira-do-hidrogenio. Acesso em: 28 set. 2023.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **Global demand for pure hydrogen, 1975-2018**. [S. l.: s. n.], 2019a. 1 gráfico. Disponível em: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-demand-for-pure-hydrogen-1975-2018>. Acesso em: 22 set. 2023.

_____. **The Future of Hydrogen. Seizing today's opportunities**. 2019b. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>. Acesso em 22 set. 2022. IRENA, Making the breakthrough: Green hydrogen policies and technology costs. **International Renewable Energy Agency**. 2021

_____. Global hydrogen trade to meet the 1.5°C climate goal: Part II – Technology review of hydrogen carriers. **International Renewable Energy Agency**. 2022

_____. Emanuele Taibi *et al.* **Green hydrogen cost reduction**: Scalig up electrolysers to meed the 1.5°C climate goal. 2020. Figura. ISBN: 978-92-9260-295-6. Disponível em: irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Dec/IRENA_Green_hydrogen_cost_2020.pdf. Acesso em: 20 set. 2023.

ITAIPU BINACIONAL. Parque Tecnológico Itaipu (PTI). **O que tem sido trabalhado na temática do hidrogênio no Parque Tecnológico Itaipu?**: O que tem sido trabalhado na temática do hidrogênio no Parque Tecnológico Itaipu?. [S. l.]: Parque Tecnológico Itaipu, 16 nov. 2022. Disponível em: <https://www.pti.org.br/o-que-tem-sido-trabalhado-na-tematica-do-hidrogenio-no-parque-tecnologico-itaipu/>. Acesso em: 26 out. 2023.



LIMA, L. V. G. et al. Mapeamento do Setor de Hidrogênio Brasileiro: Panorama Atual e Potenciais para o Hidrogênio Verde. **Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH**. 27 out. 2021. Disponível em: <http://arquivos.saebrasil.org.br/2021/Mapeamento-H2.pdf>. Acesso em: 19 set. 2023.

MORGAN, Harry. Green Hydrogen reaches parity before 2026, says Rethink. **Weekly analysis**, Rethink technology research, 2 set. 2021. Disponível em: rethinkresearch.biz/articles/green-hydrogen-reaches-parity-before-2026-says-rethink/. Acesso em: 20 set. 2023.

PALESTRA COMITÊ ABEMI COM PROF. PAULO EMILIO DE MIRANDA, 2022, Evento híbrido. **Hidrogênio Renovável - O presente e o futuro [...]**. ABEMI: [s. n.], 2022.

SANTOS, V. et al. DESAFIOS E OPORTUNIDADES PARA O BRASIL COM O HIDROGÊNIO VERDE. **Heinrich Böll Stiftung**. 2021. Disponível em: <https://emasenergia.org/publicacao/desafios-e-oportunidades-para-o-brasil-com-o-hidrogenio-verde/>. Acesso em: 19 set. 2022.

SZYMCZAK, Pat Davis. Inner Mongolia Greenlights China's Biggest Hydrogen Deal Yet: China will launch renewables-to-hydrogen projects in Inner Mongolia this autumn intended to transform the coal-bearing region into a renewables hub. **Journal of Petroleum Technology**, [S. l.], 23 ago. 2021. Decarbonization, p. 1. Disponível em: jpt.spe.org/inner-mongolia-greenlights-chinas-biggest-hydrogen-deal-yet. Acesso em: 29 set. 2023.

THE GOLDMAN SACHS GROUP, INC. Alberto Gandolfi *et al.* Green Hydrogen: The next transformational driver of the Utilities industr. **EQUITY RESEARCH**, USA, p. 2-29, 22 set. 2020. Disponível em: <https://www.goldmansachs.com/insights/pages/gs-research/green-hydrogen/report.pdf>. Acesso em: 26 set. 2023.

VILARINO, Cleyton. Unigel investe US\$ 120 milhões em usina de hidrogênio verde: Planta de nitrogenados da Unigel passará a operar em 2023 com capacidade de 60 mil toneladas anuais. **Globo Rural**, CAMAÇARI (BA), p. 1-2, 26 jul. 2022. Disponível em: globo.rural.globo.com/Noticias/Empresas-e-Negocios/noticia/2022/07/unigel-investe-us-120-milhoes-em-usina-de-hidrogenio-verde.html. Acesso em: 7 out. 2022.

WILKINSON, A. VANHOOF, J. YOUNG, M. et al. WORKING PAPER | HYDROGEN DEMAND AND COST DYNAMICS. **World Energy Council**. 2021. Disponível em: <https://www.worldenergy.org/publications/entry/working-paper-hydrogen-demand-and-cost-dynamics>. Acesso em: 23 set. 2023.

WORLD ENERGY COUNCIL. **Hydrogen Study**: International H2 Strategies. 2020. 1 Figura. Disponível em: <https://www.onthemosway.eu/wp-content/uploads/2020/12/World-Energy-Council.pdf>. Acesso em 25 de fevereiro de 2023.