rLAS® v.7, n.3 Especial (2025)
EIXO III: Meio Ambiente e Processos Produtivos Sustentáveis
ISSN: 2526-219X

Hidrogênio verde, potencial e desafios: uma revisão de literatura

Green hydrogen, potential and challenges: a literature review

Mikhail Zimmer Heidrich[1*], Mari Aurora Favero Reis[1], Cristina Keiko Yamaguchi[1]
[1]Mestrado em Sistemas Produtivos (UNIPLAC, UNC, UNESC e UNIVILLE), Universidade do Planalto Catarinense, Lages, Santa Catarina, Brasil.
*Autor para correspondência: mikhail@uniplaclages.edu.br

RESUMO

O hidrogênio verde surge como uma solução promissora na descarbonização global, produzido por eletrólise da água utilizando energia renovável, sem emissões de carbono. Este artigo busca analisar as características, vantagens e desafios do hidrogênio verde como vetor energético sustentável, com base em evidências científicas recentes, destacando seu potencial para contribuir com a descarbonização e a segurança energética. Os resultados destacam seu potencial em setores de difícil descarbonização, como transporte pesado e indústria, bem como seu papel no armazenamento de energia renovável. Entre os desafios, altos custos de produção e limitações tecnológicas ainda impedem sua adoção em larga escala. Conclui-se que políticas públicas, investimentos e inovações são essenciais para viabilizar o hidrogênio verde como pilar da transição energética sustentável.
Palavras-chave: hidrogênio verde; energia renovável; transição energética.

ABSTRACT

Green hydrogen is emerging as a promising solution for global decarbonization, produced by water electrolysis using renewable energy, without carbon emissions. This article aims to analyze the characteristics, advantages and challenges of green hydrogen as a sustainable energy vector, based on recent scientific evidence, highlighting its potential to contribute to decarbonization and energy security. The results highlight its potential in sectors that are difficult to decarbonize, such as heavy transport and industry, as well as its role in the storage of renewable energy. Among the challenges, high production costs and technological

limitations still prevent its large-scale adoption. It is concluded that public policies, investments and innovations are essential to make green hydrogen viable as a pillar of the sustainable energy transition.

Keywords: green hydrogen; renewable energy; energy transition.

1 INTRODUÇÃO

O hidrogênio verde tem se destacado como alternativa promissora na transição energética para mudanças globais na descarbonização do planeta. Como energia, o hidrogênio verde pode ser utilizado como armazenamento de energia renovável, estabilizando todo o sistema elétrico e auxiliando na descarbonização do sistema elétrico (Saha *et al.*, 2024). No entanto, a adoção em larga escala do hidrogênio verde enfrenta desafios, como custos elevados de produção, necessidade de avanços tecnológicos e infraestrutura adequada (Hassan *et al.*, 2024; Jumah, 2024; Łosiewicz, 2024).

Este trabalho é relevante para pesquisadores, formuladores de políticas e indústrias, pois sintetiza conhecimentos conceituais e teóricos para o desenvolvimento de estratégias alinhadas à sustentabilidade energética e às metas climáticas globais, como o Acordo de Paris (Shukla *et al.*, 2022). O hidrogênio verde é um combustível livre de carbono e os processos de produção ocorre com a separação das moléculas de água em hidrogênio e oxigênio por eletricidade gerada a partir de fontes de energia renováveis, como a energia eólica e solar, fontes em expansão na matriz elétrica brasileira (Mohamed Elshafei; Mansour, 2023).

Esta revisão faz parte da pesquisa para projeto de dissertação de mestrado e está organizada em três eixos: (1) histórico e propriedades do hidrogênio, (2) comparação entre hidrogênio cinza, azul e verde, e (3) aplicações do hidrogênio verde no armazenamento de energia e transição energética. A metodologia baseia-se em análise de literatura recente, selecionada por critérios de relevância e rigor científico, com apoio de ferramentas de Inteligência Artificial. O objetivo está em analisar as características, vantagens e desafios do hidrogênio verde como vetor energético sustentável, com base em evidências científicas recentes, destacando seu potencial para contribuir com a descarbonização e a segurança energética.

2 METODOLOGIA

Para a elaboração deste artigo, foram utilizadas as plataformas *Consensus* e *SciSpace* como ferramentas de busca inicial dos artigos. No *Consensus*, as perguntas foram realizadas em inglês e as principais perguntas feitas foram: "*What is the origin of the term hydrogen?*", "*Who has discovered hydrogen element?*", "*What are the main chemical and physical properties of hydrogen gas?*", "*What are the differences between gray, blue, and green hydrogen?*" e "*How can green hydrogen contribute to the energy transition?*". Já no *SciSpace*, empregou-se o português, idioma suportado pela plataforma. Em ambas as ferramentas, aplicaram-se filtros para selecionar artigos revisados por pares, com alto número de citações e maior relevância científica, priorizando publicações recentes. Os artigos selecionados foram acessados por completo no portal de Periódicos da Capes.

A busca a artigos priorizou aqueles publicados nos últimos 5 anos, dada a rápida evolução das pesquisas sobre hidrogênio verde e transição energética. As respostas geradas pelas plataformas foram validadas diretamente nos artigos originais, assegurando a confiabilidade das fontes. Por fim, utilizou-se a plataforma *DeepSeek* para a revisão textual e refinamento textual, corrigindo imperfeições na escrita. O aprimoramento e a clareza das análises foram com base nas evidências coletadas nos artigos, sem inserir novas informações escrita generativa da IA.

3 RESULTADOS

Seção 1: Histórico e Propriedades do Hidrogênio

A primeira identificação do hidrogênio como substância foi realizada pelo físico-químico Henry Cavendish em 1766, que o descreveu como um gás incolor, inodoro e altamente combustível, com densidade significativamente menor que a do ar atmosférico. Cavendish denominou este composto como 'ar inflamável' e demonstrou sua propriedade de formar água (H2O) através de combustão controlada em atmosfera de oxigênio (O2). (Bockris, 2011, 2013).

A nomenclatura 'hidrogênio' foi estabelecida por Antoine-Laurent Lavoisier em 1783, derivando das raízes gregas *'hydro'* (água) e *'genes'* (gerador), em referência à sua característica propriedade de formar água durante reações de oxidação. Lavoisier incluiu o elemento em seu

sistema de nomenclatura química, consolidando sua identificação como elemento químico fundamental. (Bockris, 2011).

O hidrogênio é o elemento químico mais simples e abundante presente no universo. A sua representação é dada pela letra H e o seu número atômico é 1 - átomos de hidrogênio contêm um próton e um elétron. Além disso, o hidrogênio é o elemento mais abundante (75% da massa universal), ocorrendo principalmente como H2 na Terra e em compostos como H2O(“Hydrogen atom”, 2012). Ele também existe como gás hidrogênio (H2), sua forma mais comum na Terra, cujo formato é o principal foco deste estudo. Este gás apresenta propriedades físicas e químicas distintas que o tornam único em diversas aplicações. (“Hydrogen atom”, 2012).

Dentre suas principais propriedades físicas cita-se a sua densidade e viscosidade consideradas muito baixas em comparação com outros gases (Abd *et al.*, 2021; Dell’Isola *et al.*, 2021). No que tange às suas propriedades químicas, o hidrogênio se caracteriza por ampla inflamabilidade e uma elevada taxa de propagação de chama. Tais atributos permitem uma combustão eficiente e estável, conferindo ao hidrogênio um grande potencial para aplicações energéticas sustentáveis (Falfari *et al.*, 2023; Leicher *et al.*, 2022). Além disso, a combustão de gás hidrogênio não produz emissões de carbono, monóxido de carbono ou dióxido de carbono, fazendo dele um combustível que não agride o ambiente (Falfari *et al.*, 2023; Leicher *et al.*, 2022). A respeito das características termodinâmicas, o hidrogênio possui alto valor calorífico, o que resulta em elevado conteúdo energético do gás ou das misturas de gases em que ele se apresenta (Dell’Isola *et al.*, 2021).

Todas essas propriedades tornam o hidrogênio um vetor de energia complexo e ao mesmo tempo, promissor (Abd *et al.*, 2021; Falfari *et al.*, 2023; Leicher *et al.*, 2022). As características singulares do hidrogênio, tanto físicas quanto químicas, fazem dele um elemento notável para usos em contextos industriais e energéticos, especialmente em cenários de transição para fontes mais limpas e renováveis.

Seção 2: Comparação entre hidrogênio cinza, azul e verde

O hidrogênio cinza é produzido a partir do gás natural por meio do processo de reforma a vapor de metano (SMR, do inglês *Steam Methane Reforming*). Esse método consiste na reação do metano (CH4) presente no gás natural com vapor de água (H2O) em condições de alta temperatura, gerando hidrogênio (H2) e dióxido de carbono (CO2) como subproduto (Saha *et*

al., 2024). Atualmente, esse é o método mais utilizado e economicamente viável para a produção de hidrogênio em escala industrial, o que justifica sua ampla adoção. No entanto, essa técnica apresenta impactos ambientais significativos, uma vez que não integra sistemas de captura, utilização e armazenamento de carbono (CCUS, do inglês *Carbon Capture, Utilization, and Storage*), que resulta em emissões consideráveis de CO2, um gás de efeito estufa que contribui para o aquecimento global. Consequentemente, embora o hidrogênio cinza seja uma fonte energética amplamente empregada, sua produção não é compatível com as metas globais de redução de emissões, devido ao seu elevado impacto ambiental (Saha *et al.*, 2024).

Outra variante é o hidrogênio azul, produzido a partir de combustíveis fósseis, de forma semelhante ao hidrogênio cinza, por meio do processo de SMR do gás natural. A principal diferença em relação ao hidrogênio cinza está no uso de tecnologias CCUS, que reduzem as emissões de CO2 associadas ao processo (Bauer *et al.*, 2021; Yu, Wang e Vredenburg, 2021).

Embora o hidrogênio azul represente uma redução substancial nas emissões de CO2 em comparação ao hidrogênio cinza, ele não é completamente isento de emissões. Vazamentos de metano durante a extração, processamento e transporte do gás natural podem comprometer esses benefícios, uma vez que o metano possui um potencial de aquecimento global significativamente maior que o CO2. Estudos indicam que, em cenários com baixa eficiência de captura de carbono ou altas taxas de vazamento de metano, o impacto climático do hidrogênio azul pode se aproximar ou até superar o do hidrogênio cinza (Bauer *et al.*, 2021; Howarth; Jacobson, 2021).

Do ponto de vista econômico, a viabilidade do hidrogênio azul está intimamente ligada aos custos da tecnologia CCUS. Embora seja geralmente mais competitivo em termos de custo do que o hidrogênio verde, os investimentos necessários para a captura, transporte e armazenamento de CO2 podem representar uma barreira significativa para sua adoção em larga escala (Noussan *et al.*, 2020; Yu, Wang; Vredenburg, 2021). O hidrogênio verde, no entanto, é um tipo de hidrogênio considerado um vetor energético limpo e sustentável, produzido por meio da eletrólise da água, utilizando eletricidade gerada a partir de fontes renováveis, como energia eólica e solar. Esse processo eletroquímico divide a molécula de água (H2O) em hidrogênio (H2) e oxigênio (O2), resultando em um combustível livre de carbono e sem emissões diretas de gases de efeito estufa durante sua produção (Hassan *et al.*, 2024; Jumah, 2024; Mohamed Elshafei; Mansour, 2023).

Apesar de seus benefícios ambientais, a produção de hidrogênio verde enfrenta desafios significativos, principalmente relacionados aos custos elevados. A ampla adoção dessa tecnologia depende de reduções de custos, avanços tecnológicos e políticas públicas de apoio, como subsídios, incentivos fiscais e regulamentações favoráveis (Hassan *et al.*, 2024; Jumah, 2024; Łosiewicz, 2024).

Seção 3: Hidrogênio Verde no armazenamento de energia e transição energética

O hidrogênio verde é considerado um componente-chave na transição global para uma economia de baixo carbono devido ao seu caráter limpo e sustentável. Ele possui potencial para descarbonizar setores de difícil redução de emissões, como transporte pesado, indústria química e siderurgia. Além disso, desempenha um papel crucial no armazenamento de energia e no balanceamento de redes elétricas intermitentes, contribuindo para a estabilização do sistema energético (Du *et al.*, 2024; Hassan *et al.*, 2024; Mohamed Elshafei; Mansour, 2023).

A versatilidade do hidrogênio verde permite sua aplicação em diversos setores, incluindo transporte, aquecimento e processos industriais. Ele também serve como uma solução para armazenar o excesso de energia renovável gerada em períodos de alta produção, ajudando a equilibrar a oferta e a demanda na rede elétrica e aumentando a resiliência do sistema (Barbosa *et al.*, 2024; Sarker *et al.*, 2023).

Há um interesse e investimento global significativo em hidrogênio verde, com a Europa e a Ásia liderando esforços de pesquisa, desenvolvimento e implantação de projetos piloto e comerciais. Essas regiões estão estabelecendo estratégias e políticas robustas para acelerar a adoção do hidrogênio verde como parte de suas metas de descarbonização (Fernández-Arias *et al.*, 2024; Vallejos-Romero *et al.*, 2022).

4 CONCLUSÕES

Esta revisão de literatura demonstrou que, embora o hidrogênio cinza e o azul ainda dominem a produção atual devido a fatores econômicos, suas emissões de carbono e dependência de combustíveis fósseis os tornam incompatíveis com as metas globais de descarbonização. O hidrogênio verde, produzido a partir de fontes renováveis, apresenta-se como uma solução viável para diferentes sistemas produtivos. No entanto, os desafios associados aos custos elevados de produção, à necessidade de avanços tecnológicos e à

infraestrutura limitada ainda impedem sua adoção em larga escala. Mudanças nas políticas públicas, incentivos financeiros e cooperação internacional podem contribuir para superar essas barreiras e acelerar a expansão na produção do hidrogênio verde.

Em síntese, este trabalho reforça o potencial do hidrogênio verde como vetor energético do futuro, destacando a urgência de investimentos em pesquisa, desenvolvimento e implementação de projetos piloto. A transição para uma economia baseada em hidrogênio verde não só contribuirá para a mitigação das mudanças climáticas, mas também promoverá a segurança energética e o desenvolvimento sustentável em escala global.

AGRADECIMENTOS

Ao Governo do Estado de Santa Catarina por concessão de bolsa de estudos Edital de Chamada Pública FAPESC nº 018/2024 - Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Estado de Santa Catarina (FAPESC).

REFERÊNCIAS

ABD, A. A.; NAJI, S. Z.; THIAN, T. C.; OTHMAN, M. R. Evaluation of hydrogen concentration effect on the natural gas properties and flow performance. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 46, n. 1, p. 974–983, jan. 2021.

BARBOSA, L. T. *et al.* Assessment of Green Hydrogen as Energy Supply Alternative for Isolated Power Systems and Microgrids. **Energies**, v. 17, n. 19, p. 4774, set. 2024.

BAUER, C. *et al.* **On the climate impacts of blue hydrogen production**, set. 2021.

BOCKRIS, J. O. Hydrogen. **Materials**, v. 4, n. 12, p. 2073–2091, nov. 2011.

BOCKRIS, J. O. M. The hydrogen economy: Its history. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 38, n. 6, p. 2579–2588, fev. 2013.

DELL'ISOLA, M. *et al*. Impact of Hydrogen Injection on Natural Gas Measurement. **Energies**, v. 14, n. 24, p. 8461, dez. 2021.

DU, L. *et al*. Greenhouse Gas Reduction Potential and Economics of Green Hydrogen via Water Electrolysis: A Systematic Review of Value-Chain-Wide Decarbonization. **Sustainability**, v. 16, n. 11, p. 4602, maio 2024.

FALFARI, S. *et al*. Hydrogen Application as a Fuel in Internal Combustion Engines. **Energies**, v. 16, n. 6, p. 2545, mar. 2023.

FERNÁNDEZ-ARIAS, P. *et al.* On Green Hydrogen Generation Technologies: A Bibliometric Review. **Applied Sciences**, v. 14, n. 6, p. 2524, mar. 2024.

HASSAN, Q. *et al.* A review of green hydrogen production by renewable resources. **Energy Harvesting and Systems**, v. 11, n. 1, jan. 2024.

HOWARTH, R. W.; JACOBSON, M. Z. How green is blue hydrogen? **Energy Science & Engineering**, v. 9, n. 10, p. 1676–1687, out. 2021.

Hydrogen atom. *In*: **Lectures on Quantum Mechanics**. [s.l.] Co-Published with Hindustan Book Agency, India. WSPC Distribute for All Markets Except in India, 2012. p. 233–257.

JUMAH, A. BIN. A comprehensive review of production, applications, and the path to a sustainable energy future with hydrogen. **RSC Advances**, v. 14, n. 36, p. 26400–26423, 2024.

LEICHER, J. *et al.* The Impact of Hydrogen Admixture into Natural Gas on Residential and Commercial Gas Appliances. **Energies**, v. 15, n. 3, p. 777, jan. 2022.

ŁOSIEWICZ, B. Technology for Green Hydrogen Production: Desk Analysis. **Energies**, v. 17, n. 17, p. 4514, set. 2024.

MOHAMED ELSHAFEI, A.; MANSOUR, R. Green Hydrogen as a Potential Solution for Reducing Carbon Emissions: A Review. **Journal of Energy Research and Reviews**, v. 13, n. 2, p. 1–10, 15 fev. 2023.

NOUSSAN, M. *et al.* The Role of Green and Blue Hydrogen in the Energy Transition—A Technological and Geopolitical Perspective. **Sustainability**, v. 13, n. 1, p. 298, dez. 2020.

SAHA, P. *et al.* Grey, blue, and green hydrogen: A comprehensive review of production methods and prospects for zero-emission energy. **International Journal of Green Energy**, v. 21, n. 6, p. 1383–1397, 2 maio 2024.

SARKER, A. K. *et al*. T. Prospect of Green Hydrogen Generation from Hybrid Renewable Energy Sources: A Review. **Energies**, v. 16, n. 3, p. 1556, fev. 2023.

SHUKLA, P. R. *et al.* **Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. UK and New York, USA: [s.n.].

VALLEJOS-ROMERO, A. *et al*. Green Hydrogen and Social Sciences: Issues, Problems, and Future Challenges. **Sustainability**, v. 15, n. 1, p. 303, dez. 2022.

YU, M.; WANG, K.; VREDENBURG, H. Insights into low-carbon hydrogen production methods: Green, blue and aqua hydrogen. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 46, n. 41, p. 21261–21273, jun. 2021.