

Hidrogênio Verde e Eletrolisadores PEM: Uma Investigação sobre Catalisadores e Tendências Científicas Atuais

Felipe P. Oliveira^{1*}, Yuri U. C. G. B. Moreira¹, Amanda S. K. de Oliveira¹.
Universidade Senai Cimatec, Salvador/BA. felipe.poliveira@fbest.org.br

Resumo/Abstract

RESUMO - A geração de hidrogênio verde via eletrólise da água é uma alternativa promissora frente à crise climática, pois não emite gases de efeito estufa quando alimentada por fontes renováveis. Este estudo foca nos catalisadores utilizados em eletrolisadores de membrana de troca de prótons (PEMWE), analisando tendências recentes por meio de uma revisão bibliométrica. A busca na base WoS identificou 150 artigos e 424 palavras-chave, reduzidas a 26 após filtragem. Os dados mostram crescimento nas publicações (2021–2025) e a forte relação dos eletrocatalisadores com metais nobres e não nobres, estruturas organo metálicas além da relevância dos nanocatalisadores.

Palavras-chave: *Hidrogênio verde, Eletrolisadores PEM, Catalisadores eletroquímicos.*

ABSTRACT - The production of green hydrogen via water electrolysis is a promising alternative in the face of the climate crisis, as it emits no greenhouse gases when powered by renewable energy sources. This study focuses on the catalysts used in proton exchange membrane water electrolyzers (PEMWE), analyzing recent trends through a bibliometric review. The search in the WoS database identified 150 articles and 424 keywords, which were reduced to 26 after filtering. The data show a growth in publications (2021–2025) and a strong relationship between electrocatalysts and both noble and non-noble metals, metal-organic frameworks, as well as the relevance of nanocatalysts.

Keywords: *Green hydrogen, PEM electrolyzers, Electrochemical catalysts.*

Introdução

A geração de energia por meio do hidrogênio verde apresenta-se como uma alternativa estratégica e promissora frente à crise climática global. Isso se deve ao fato de que a reação de eletrólise da água que ocorre nos eletrolisadores, quando alimentada por fontes renováveis de energia elétrica, produz hidrogênio (H_2), sem emissão de gases de efeito estufa. Os eletrolisadores são classificados em quatro tipos: eletrolisadores de água alcalina (AWE), eletrolisadores de membrana de troca de prótons (PEMWE), eletrolisadores de membrana de troca aniónica (AEMWE) e células de eletrólise de óxido sólido (SOEC) (1). Entre os diferentes tipos de eletrolisadores existentes, os que atualmente possuem maior comercialização e maturidade tecnológica são os do tipo AWE e PEM, ambos com Nível de Maturidade Tecnológica (TRL) 9 (2). Dentre eles, o eletrolisador do tipo PEM se destaca por sua capacidade de gerar hidrogênio com grau de pureza de 99,999% (3). Embora alguns projetos de plantas-piloto para a produção de hidrogênio verde por meio de eletrolisadores do tipo PEM estejam em desenvolvimento (4-6), sua aplicação em larga escala ainda é limitada. Isso se deve, principalmente, ao elevado custo associado à tecnologia, especialmente pelos componentes críticos, como os catalisadores à base de metais nobres, notadamente platina e irídio, que encarecem significativamente o equipamento (7). Diante desse contexto, este trabalho tem como objetivo identificar as tendências recentes dos catalisadores que estão sendo utilizados em eletrolisadores PEM por meio de uma revisão bibliométrica.

Experimental

A análise bibliométrica foi realizada com foco nos catalisadores empregados em eletrolisadores do tipo PEM utilizados na geração de hidrogênio verde. O recorte temporal adotado para o levantamento dos dados compreendeu o período de 1º de janeiro de 2021 a 19 de julho de 2025. Para assegurar a qualidade e a abrangência das informações, optou-se pela base de dados Web of Science (WoS), reconhecida por sua diversidade e relevância científica. Na fase inicial da pesquisa, estabeleceram-se grupos temáticos, conforme ilustrado na Tabela 1.

Tabela 1. Variantes e grupos temáticos da pesquisa bibliométrica

Variantes	Processo (Grupo 1)	Eletrolisador (Grupo 2)	Material (Grupo 3)
1	Hidrogênio verde	PEM	Metais nobres
2	Energia renovável	OER	Catalisadores suportados
3	Descarbonização	HER	Nanocatalisadores

Em seguida, essas categorias foram combinadas estrategicamente, a fim de filtrar publicações alinhadas diretamente ao foco do estudo. A análise dos dados foi realizada com auxílio do software VOSviewer, ferramenta que possibilitou a identificação de agrupamentos temáticos e a visualização das conexões entre as palavras chaves mapeadas.

Resultados e Discussão

Os catalisadores empregados nas reações de evolução do hidrogênio (HER) e do oxigênio (OER) possuem propriedades específicas conforme as exigências eletroquímicas de cada processo. A HER, que ocorre no cátodo durante a eletrólise da água, apresenta cinética relativamente simples e requer materiais altamente ativos para facilitar a redução de prótons em hidrogênio molecular. Metais do grupo da platina (PGMs), como platina, ródio (Rh) e irídio (Ir), destacam-se pelo desempenho superior nessa reação. Entretanto, o elevado custo desses materiais limita sua aplicação em escala industrial. Por isso, catalisadores baseados em metais de transição, como fosfetos e sulfetos metálicos, além de opções livres de metais, têm sido investigados como alternativas econômicas e ambientalmente viáveis, apresentando resultados promissores principalmente em ambientes alcalinos (8). No ânodo, a OER é um processo mais complexo, cujo avanço tecnológico depende da redução do uso de metais nobres, sem comprometer a atividade eletrocatalítica e a resistência dos materiais. Entre as opções estudadas estão aqueles à base de rutênio, irídio, ferro e cobalto, além de compostos não metálicos, catalisadores de cobre e materiais como nitretos, carbonetos e fosfetos metálicos, que têm apresentado bom desempenho e representam soluções promissoras para aplicações comerciais em grande escala (9). Com base na análise dos dados extraídos da base WoS, a combinação dos três grupos temáticos selecionados resultou na identificação de 150 artigos, totalizando 424 palavras-chave. Após a aplicação do filtro que considerou apenas termos com no mínimo três ocorrências por artigo, obteve-se uma redução para 26 palavras-chave mais relevantes (Fig. 1). Os resultados de mapeamento mostram que os clusters gerados não estão isolados, sendo interconectados por linhas que representam as relações temáticas entre os termos-chave. No mapa visual, os nós maiores indicam palavras com maior frequência de citação, enquanto as linhas que os conectam evidenciam a articulação entre os temas. Observa-se, por exemplo, a forte associação entre a reação de evolução do oxigênio (OER) e metais nobres, além de uma conexão significativa com as estruturas metal-orgânicas (MOFs), conhecidas por sua elevada área superficial, alta porosidade e flexibilidade estrutural devido à possibilidade de variação do íon metálico central. Destaca-se, ainda, que os eletrocatalisadores estão diretamente associados às reações HER e OER, o que indica tratar-se de um campo de pesquisa ativo. Dessa forma, os resultados obtidos ao longo deste estudo evidenciam a importância dos catalisadores na eficiência dos eletrolisadores PEM, fundamentais para o desenvolvimento da produção de hidrogênio verde em larga escala.

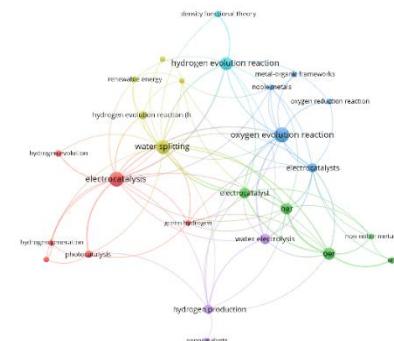


Fig. 1. Palavras-chave combinando os grupos temáticos.

Conclusões

A análise biométrica indicou um crescimento significativo nas publicações entre 2021 e 2025, destacando os nanocatalisadores e os MOFs como tendências promissoras. Assim, confirma-se que o desenvolvimento de materiais que aliam alta atividade, estabilidade, baixo custo e resistência à corrosão é essencial para o avanço tecnológico e a sustentabilidade da transição energética.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio financeiro do Programa de Recursos Humanos da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – PRH-ANP e da Universidade Senai Cimatec.

Referências

1. ARAÚJO, H. F.; GÓMEZ, J. A.; SANTOS, D. M. F. Proton-Exchange Membrane Electrolysis for Green Hydrogen Production: Fundamentals, Cost Breakdown, and Strategies to Minimize Platinum-Group Metal Content in Hydrogen Evolution Reaction Electrocatalysts. *Catalysts* 2024, Vol. 14, P. 845.
2. INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). Electrolysers. In: IEA – Energy System, Low-Emission Fuels. Disponível em: <https://www.iea.org/energy-system/low-emission-fuels/electrolysers>. Acesso em: 20 jul. 2025. Última atualização em 10 jul. 2023.
3. BESSARABOV, Dmitri et al. (Ed.). PEM electrolysis for hydrogen production: principles and applications. CRC press, 2016.
4. ABB. Tecnologia de potência pioneira da ABB irá desempenhar um papel fundamental em projeto-piloto de hidrogênio verde. News center da ABB, [s.l.], 2023. Disponível em: <https://new.abb.com/news/pt-br/detail/108872/tecnologia-de-potencia-pioneira-da-abb-ira-desempenhar-um-papel-fundamental-em-projeto-piloto-de-hidrogenio-verde>. Acesso em: 20 jul. 2025.
5. RWE. H₂ pilot plant in Lingen. In: RWE – Research and Development, Hydrogen Projects. Disponível em: <https://www.rwe.com/en/research-and-development/hydrogen-projects/lingen-pilot-h2-electrolysis-plant/>. Acesso em: 20 jul. 2025.
6. ITE – INSTITUTO TECNOLÓGICO DE LA ENERGÍA. Hydrogen pilot plant. In: Instituto Tecnológico de la Energía – Pilot plant. Disponível em: <https://www.ite.es/en/pilot-plant/hydrogen-pilot-plant/>. Acesso em: 20 jul. 2025.
7. WANG, Yun et al. PEM Fuel cell and electrolysis cell technologies and hydrogen infrastructure development—a review. *Energy & Environmental Science*, v. 15, n. 6, p. 2288-2328, 2022.
8. LIANG, X. et al. Developments and challenges of catalytic materials for green hydrogen production. *Energy Lab*, v. 1, n. 2, p. 220013–1, 2023.
9. HYUNG, K. D.; JEON, I. Y.; BAEK, J. B. Electrochemical Catalysts for Green Hydrogen Energy. *Advanced Energy and Sustainability Research*, v. 2, n. 7, p. 2100019, 2021.