

12º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS



TÍTULO DO TRABALHO:

ANÁLISE DE TECNOLOGIAS PARA OBTENÇÃO DE HIDROGÊNIO VERDE (H₂V) A PARTIR DE ÁGUAS SALINAS

AUTORES:

KAREN GIOVANNA DUARTE MAGALHÃES, MAYARA ADRIELLY LEAL DE OLIVEIRA RODRIGUES, EDNEY RAFAEL VIANA PINHEIRO GALVÃO, JOSÉ HERIBERTO OLIVEIRA DO NASCIMENTO, CARLOS ALBERTO MARTINEZ-HUITLE, ELISAMA VIEIRA DOS SANTOS

INSTITUIÇÃO:

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE, NATAL - RN - BRASIL

ANÁLISE DE TECNOLOGIAS PARA OBTENÇÃO DE HIDROGÊNIO VERDE (H₂V) A PARTIR DE ÁGUAS SALINAS

Resumo

O aumento da demanda energética mundial, combinado à crescente pressão para reduzir as emissões de dióxido de carbono (CO₂) na atmosfera, potencializam a busca por soluções tecnológicas que estejam alinhadas ao desenvolvimento sustentável. Nesse contexto, o hidrogênio (H₂) pode integralizar diversos setores da indústria e da economia ao setor elétrico, promovendo a chamada descarbonização. Embora existam vários processos de produção de H₂, a eletrólise da água com uso de eletricidade renovável tem se destacado nos últimos anos. Nesse processo, o H₂, conhecido como hidrogênio verde (H₂V) ou de baixo carbono, é produzido de maneira mais sustentável. Além disso, dadas as recentes discussões acerca da escassez de água potável, a água do mar, por sua vez, é um recurso hídrico inesgotável e um eletrólito natural com grande potencial para aplicação ao processo de eletrólise. Assim, as águas salinas posicionam-se como uma possível solução para produção de hidrogênio *via* eletrólise sem competição com reservas de água doce. Contudo, há desafios na aplicação direta de águas salinas no sistema eletroquímico devido à complexidade do efluente, à corrosão acelerada dos eletrodos e à competição eletroquímica entre a Reação de Evolução do Oxigênio (REO) e a Reação de Evolução do Cloro (REC). Nesse contexto, o presente trabalho consiste em uma Revisão Bibliográfica Sistemática (RBS) acerca das tecnologias de eletrólise com uso direto de águas salinas para produção de H₂V. A busca por artigos do tipo “Research article” publicados de 2020 a 2024, em inglês, foi executada nas bases de dados *Web of Science*, *Science Direct* e *SCOPUS*. As combinações de palavras-chave “green hydrogen”, “electrolysis” e “saline water”; e “green hydrogen”, “seawater” e “direct”; utilizando o operador lógico booleano “e” (“and”), foram aplicadas em cada base de dados. Após exclusão de artigos duplicados ou fora do escopo deste trabalho, foram obtidos 32 artigos. Dentre os artigos investigados, destacam-se as tendências: (i) A adição de hidróxido de potássio para controle do pH foi citada como uma abordagem eficaz; (ii) Observou-se que 15,625 % dos artigos selecionados se concentram na dessalinização da água salobra; (iii) Foi observado que 53,125 % dos artigos selecionados concentram-se na aplicação de eletrocatalisadores para as reações de evolução do hidrogênio (HER) e oxigênio (OER); (iv) Por fim, dentre os eletrocatalisadores metálicos utilizados, destacaram-se os binários e ternários, especialmente contendo níquel (Ni), como os mais citados.

Palavras-chave: Eletrólise, Hidrogênio Verde, Água do mar, Revisão Bibliográfica Sistemática.

Abstract

The increase in global energy demand, combined with growing pressure to reduce carbon dioxide (CO₂) emissions into the atmosphere, is driving the search for technological solutions that are aligned with sustainable development. In this context, hydrogen (H₂) can integrate various sectors of industry and the economy into the electricity sector, promoting the so-called decarbonization. Although there are several processes for producing H₂, water electrolysis using renewable electricity has stood out in recent years. In this process, H₂, known as green hydrogen (GH₂) or low-carbon hydrogen, is produced in a more sustainable manner. Furthermore, given the recent discussions about the scarcity of potable water, seawater, in turn, is an inexhaustible water resource and a natural electrolyte with great potential for application in the electrolysis process. Thus, saline waters are positioned as a possible solution for hydrogen production via electrolysis without competing with freshwater reserves. However, there are challenges in the direct application of saline waters in the electrochemical system due to the complexity of the effluent, accelerated corrosion of the electrodes and electrochemical competition between the Oxygen Evolution Reaction (OER) and the Chlorine Evolution Reaction (CER). In this context, the

present work consists of a Systematic Bibliographic Review (SBR) on electrolysis technologies with direct use of saline waters for GH_2 production. The search for articles of the type “Research article” published from 2020 to 2024 in the English language was performed in the Web of Science, Science Direct and SCOPUS databases. The keyword combinations “green hydrogen”, “electrolysis” AND “saline water”; and “green hydrogen”, “seawater” AND “direct”; using the Boolean logical operator “and”, were applied in each database. After excluding duplicate articles or articles outside the scope of this work, 32 articles were obtained. Among the investigated articles, the following trends stand out: (i) The addition of potassium hydroxide for pH control was cited as an effective approach; (ii) It was observed that 15.625% of the selected articles focus on the desalination of brackish water; (iii) It was observed that 53.125% of the selected articles focus on the application of electrocatalysts for hydrogen evolution (HER) and oxygen evolution (OER) reactions; (iv) Finally, among the metallic electrocatalysts used, binary and ternary ones, especially those containing nickel (Ni), stood out as the most cited.

Keywords: Electrolysis, Green hydrogen, Seawater, Systematic Bibliographic Review.

Introdução

Atualmente o mundo enfrenta uma intensa crise climática, gerada pelo rápido crescimento da população e do consumo de energia nos últimos anos (ONU, 2019). Assim, o aumento dos níveis de dióxido de carbono (CO_2) na atmosfera terrestre tem aquecido de forma abrupta sua temperatura, o que tem causado catástrofes em várias regiões do planeta. Com o intuito de limitar o aumento da temperatura global a 1,5 °C acima dos níveis pré-industriais, foi assinado em 2015 o Acordo de Paris (ONU, 2015b). Esse tratado global representa o compromisso dos países signatários de atingir emissões líquidas zero (*net zero-emissions*) de CO_2 até 2050 (ONU, 2015a; IEA, 2021a; IRENA, 2022). Para assegurar o cumprimento dessa meta, vários países têm elaborado estratégias para acelerar seu processo de descarbonização, baseando-se em energias renováveis, eletrificação, eficiência energética e hidrogênio (IRENA, 2022).

Nessa perspectiva, a produção de hidrogênio por meio do processo de eletrólise da água com uso de energia renovável posiciona-se como um método inovador e ecologicamente adequado para gerar hidrogênio com menores emissões em CO_2 , denominado Hidrogênio Verde (H_2V) (ARSAD *et al.*, 2024). O hidrogênio verde surge como vetor estratégico para descarbonização de setores de difícil abatimento (MME, 2023), além de desempenhar papel chave na segurança energética (IRENA, 2022b). Com isso, o hidrogênio surge como um dos principais vetores energéticos, oferecendo uma combinação de benefícios sociais, econômicos e ambientais, diversificando as matrizes e neutralizar as emissões de carbono (KOTAY; DAS, 2008). Além disso, essa rota de obtenção de H_2 é a única tecnologia para produção de H_2V aplicada em escala comercial (MARTINEZ-BURGOS *et al.*, 2021).

Os meios tecnológicos para obtenção de H_2V a partir da eletrólise da água, se diversificam em tecnologias já bem estabelecidas ou em até mesmo mais recentes. Essas tecnologias podem variar a sua base no eletrólito, condições de operação ou agentes iônicos. Das principais tecnologias estudadas, destacam-se: Eletrólise Alcalina (EA); Eletrólise com Membrana de Troca Aniônica (AEM); Eletrólise com Membrana Troca Prótons (PEM); e Eletrólise de Óxido Sólido (SOE).

A EA oferece vantagens na comercialização para processos industriais e permite o uso de eletrocatalisadores livres de metais nobres. No entanto, entre as desvantagens, estão o possível cruzamento de gases, o que pode reduzir o rendimento do hidrogênio produzido, e as densidades de

corrente limitadas. Igualmente à EA, a AEM utiliza-se de eletrocatalisadores livres de metais nobres em seu processo, todavia enfrenta desafios como estabilidade limitada e está em fase de desenvolvimento científico. Para sistemas ácidos, a PEM se destaca pela resposta rápida do processo, capacidade de operar em alta densidade de corrente e pela alta pureza dos gases produzidos. Entretanto, a PEM apresenta custos elevados dos componentes do eletrolisador e a necessidade de eletrocatalisadores constituídos de metais nobres. Por fim, a SOE apresenta-se como uma tecnologia recente que se destaca por sua alta eficiência na produção de hidrogênio e opera em pressões relativamente baixas em comparação as tecnologias anteriores (IRENA, 2020; SHIVA KUMAR & LIM, 2022).

Porém, a eletrólise necessita de grandes volumes de água para a obtenção H_2 , sendo necessário por volta de 9 litros de água pura para a produção de 1 kg de H_2 , tendo como base uma eficiência teórica de 100% (ASGHARI *et al.*, 2022) o que na realidade apresenta-se menor devido aos erros, barreiras e perdas no processo. Dessa forma, em decorrência à escassez de água doce e potável no planeta, o uso de águas salinas e residuárias como eletrólito para a produção de H_2V tem se apresentado como um método promissor e seu potencial de facilitar o avanço da indústria, por ser um recurso ilimitado e abundante (SANLI *et al.*, 2014; PEDROZA, 2022; BADRELDIN *et al.*, 2022; ASGHARI *et al.*, 2022).

No entanto, a fim de avançar a produção de hidrogênio a partir de águas salinas, se faz necessário o investimento em pesquisas e desenvolvimento científico devido aos desafios inerentes a esse processo, em especial a complexidade dos efluentes, a corrosão do sistema e as reações concorrentes, como a evolução de oxigênio (OER) e a evolução de cloro (CER) (MARIL *et al.*, 2022).

De acordo com Levy e Ellis (2006), a Revisão Bibliográfica Sistemática (RBS) é um método que envolve a coleta, avaliação, interpretação e síntese de um conjunto de artigos científicos, com o objetivo de criar um embasamento teórico-científico sobre um tópico ou assunto específico. A RBS tem como objetivo gerar conhecimentos estruturados sobre um tema de pesquisa e pode ser utilizada para fazer previsões sobre o tema estudado (WEBSTER; WATSON, 2002).

Dessa forma, o presente estudo realizou uma Revisão Bibliográfica Sistemática (RBS) sobre tecnologias de eletrólise utilizando diretamente águas salinas para a produção de hidrogênio verde (H_2V), destacando sua relevância frente à escassez de água doce e os desafios técnicos envolvidos.

Metodologia

O procedimento dessa pesquisa seguiu quatro fases (Figura 1): (1) Planejamento da RBS; (2) Pesquisa e seleção dos artigos; (3) Análise descritiva dos artigos; (4) Identificação e interpretação dos *highlights*.

Figura 1. Etapas do método de pesquisa da Revisão Bibliográfica Sistemática (RBS).



Fonte: Autor(a) (2024).

A 1ª Etapa consiste no planejamento da RBS a partir da definição do problema, identificação das palavras-chave e identificação das bases de dados. O problema em questão apresenta como tema: **“Quais são as principais tecnologias para obtenção de hidrogênio verde em meio salino?”**. A partir da problemática definida, as combinações de palavras-chave foram selecionadas, sendo elas: “*green hydrogen*”, “*electrolysis*” AND “*saline water*”; e “*green hydrogen*”, “*seawater*” AND “*direct*”; utilizando o operador lógico booleano “e” (“*and*”). Por fim, aplica-se todas as combinações em cada base de dados.

Na 2ª Etapa, foram pesquisados por artigos do tipo “*Research article*” publicados de 2020 a 2024 no idioma inglês, esses artigos pertencem as bases de dados *Web of Science*, *Science Direct* e *SCOPUS*. Como resultado foram obtidos 38 artigos, que, após a eliminação de artigos duplicados (uma vez que a busca foi realizada em mais de uma base de indexação) permaneceram selecionados 32 artigos para a leitura completa e o desenvolvimento da RBS.

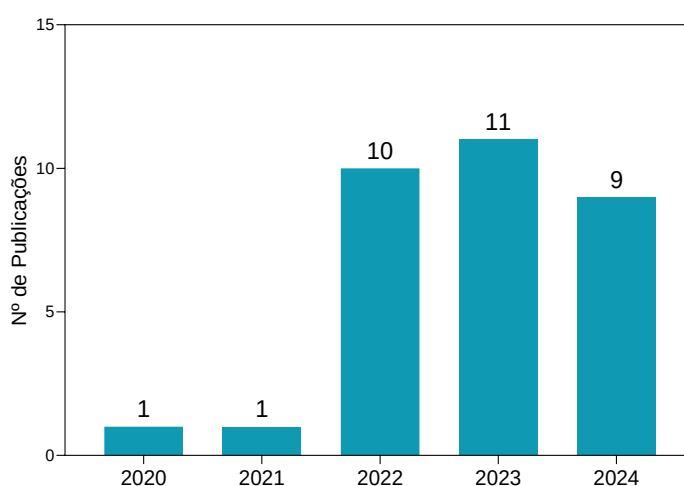
Na 3ª Etapa, os artigos foram lidos na íntegra, com análise de conteúdo e fichamento. Durante a análise de conteúdo, foram coletados informações bibliográficas, objetivos, métodos de pesquisa e a contribuição de cada estudo para a questão central deste trabalho. Com relação ao fichamento, os dados coletados foram dispostos em uma tabela para a análise da RBS.

Por fim, na 4ª Etapa, foi realizada a estruturação e análise crítica dos *highlights* encontrados nos trabalhos, identificando e criando relações entre os pontos comuns entre os estudos.

Resultados e Discussão

Na Figura 2, observa-se a distribuição da quantidade de trabalhos ao longo dos anos, evidenciando uma tendência de crescimento na área. Essa tendência é particularmente notável ao considerar que o estudo coletou apenas trabalhos publicados no primeiro semestre de 2024. Seguindo essa tendência, é provável que o ano de 2024 registre um aumento significativo nas publicações relacionadas à produção de hidrogênio em meio salino de forma direta, especialmente em comparação com os anos anteriores.

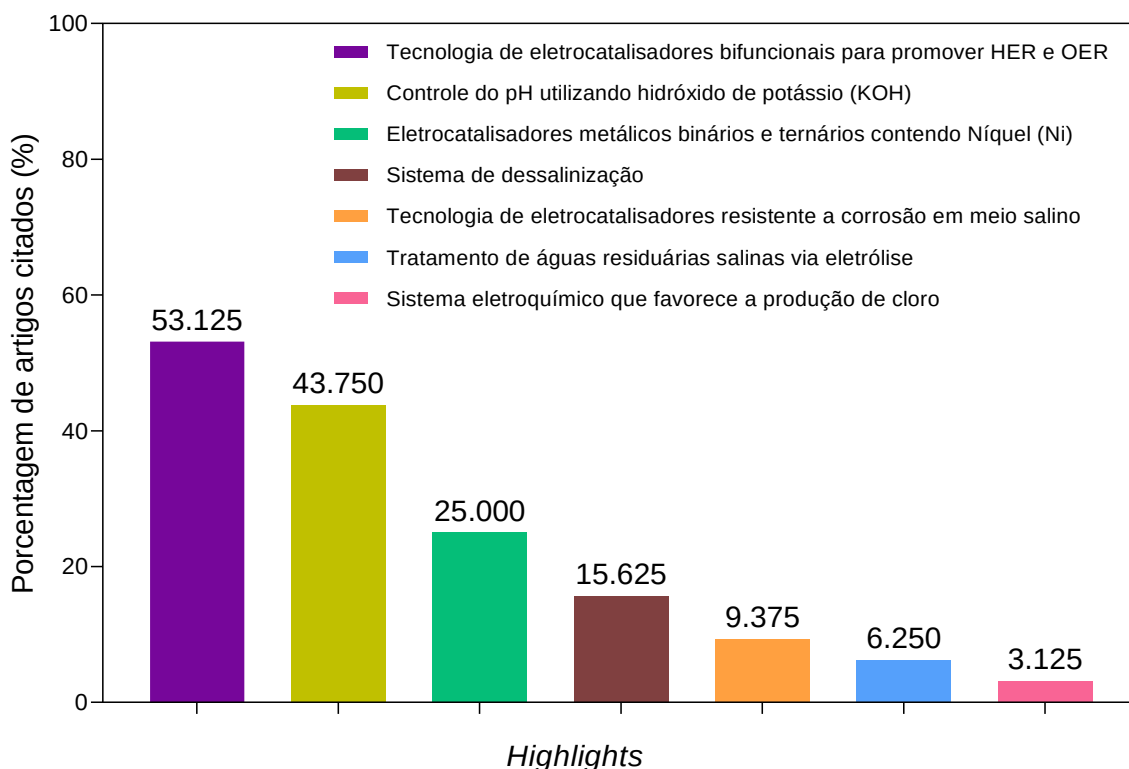
Figura 2. Distribuição anual da quantidade de artigos coletados sobre a produção de hidrogênio utilizando sistemas eletroquímicos com efluentes salinos (2020-2024).



Fonte: Autor(a) (2024).

A partir da interpretação da base de dados desse estudo, observou-se uma tendência nas tecnologias empregadas nos trabalhos analisados. Na Figura 3, destacam-se as seguintes tecnologias: eletrocatalisadores bifuncionais para as reações de evolução de hidrogênio (HER) e de oxigênio (OER); sistemas de dessalinização; controle de pH com hidróxido de potássio (KOH); eletrocatalisadores metálicos binários e ternários contendo níquel (Ni); tecnologias resistentes à corrosão em meio salino; tratamento de águas residuárias salinas via eletrólise; sistemas eletroquímicos para a produção de cloro.

Figura 3. Principais destaques tecnológicos e metodológicos observados nos artigos analisados (2020-2024).



Fonte: Autor(a) (2024).

Conclusões

Esse trabalho pôde destacar o acentuado aumento da produção científica relacionada ao tema de tecnologias de eletrólise para produção de H_2V com uso de águas salinas. Essa tendência está em concordância com o interesse mundial pelo hidrogênio verde como vetor energético para descarbonização da economia. Além disso, evidencia-se que para a produção de H_2V ser considerada socioambientalmente aceitável, a comunidade científica deve continuar os esforços para a aplicação de fontes alternativas de água – que não seja a de consumo humano – a essas tecnologias.

Em conclusão, o estudo executado contribui para o avanço do estado da arte acerca de tecnologias de eletrólise para produção de H_2V com uso de águas salinas pois (i) forneceu informações encontradas conforme procedimento sistemático e inovador, preenchendo a lacuna de pesquisa relacionada à ausência de estudos sistemáticos acerca do tema, (ii) identificou as estratégias que viabilizam maior eficiência produtiva, bem como (iii) desenvolveu correlações entre as possíveis condições de operação e especificações das tecnologias, como os tipos de eletrocatalisadores.

Ademais, conclui-se que o estudo foi relevante para consolidar o conhecimento das recentes tendências científico-tecnológicas na área de produção de H₂V com águas salinas, bem como para direcionar de forma embasada e metodológica pesquisas e projetos de pesquisa que se concentrem na temática.

Agradecimentos

Esta pesquisa teve o apoio financeiro do Programa de Recursos Humanos da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – PRH-ANP 26.1, suportado com recursos provenientes do investimento de empresas petrolíferas qualificadas na Cláusula de PD&I da Resolução ANP nº 50/2015. Agradecemos a Universidade Federal do Rio Grande do Norte, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química (PPgEQ/UFRN) e ao Laboratório de Eletroquímica Ambiental e Aplicada.

Referências Bibliográficas

AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA (IEA). Net Zero by 2050 - A Roadmap for the Global Energy Sector. 2021a. Disponível em: https://iea.blob.core.windows.net/assets/deebef5d-0c34-4539-9d0c-10b13d840027/NetZeroBy2050-ARoadmapfortheGlobalEnergySector_CORR.pdf. Acesso em: 22 jul. 2024.

AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIAS RENOVÁVEIS (IRENA). Geopolitics of the Energy Transformation: The Hydrogen Factor. 2022b. Disponível em: <https://irena.org/publications/2022/Jan/Geopolitics-of-the-Energy-Transformation-Hydrogen>. Acesso em: 25 jul. 2024.

ARSAD, S. R. *et al.* Recent advancement in water electrolysis for hydrogen production: A comprehensive bibliometric analysis and technology updates. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 60, p. 780-801, 2024.

ASGHARI, E. *et al.* Advances, opportunities, and challenges of hydrogen and oxygen production from seawater electrolysis: An electrocatalysis perspective. *Current Opinion in Electrochemistry*. v. 31, 2022.

BADRELDIN, A. *et al.* Solution Combustion Synthesis of Novel S, B-Codoped CoFe Oxyhydroxides for the Oxygen Evolution Reaction in Saline Water. *ACS Omega*. v. 7, ed. 6, 2022.

IRENA, E. Green hydrogen cost reduction: scaling up electrolyzers to meet the 1.5 C climate goal. in *Publications/2020/dec/green-hydrogen-cost-reduction 105* (2020).

KOTAY, S. M.; DAS, D. Biohydrogen as a renewable energy resource: prospects and potentials. *Int. J. Hydrogen Energy*, v. 33, p. 258-263, 2008. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/222619463_Biohydrogen_as_a_renewable_energy_resource_Prospects_and_potentials.

Levy, Y.; Ellis, T.J. A system approach to conduct an effective literature review in support of information systems research. *Informing Science Journal*, v.9, p.181-212, 2006.

MARIL, M. *et al.* Critical aspects in the development of anodes for use in seawater electrolysis. *International Journal of Hydrogen Energy*. v. 47, ed. 6, p. 3532-3549, 2022.

MARTINEZ-BURGOS, W. J. *et al.* Hydrogen: Current advances and patented technologies of its renewable production. *Journal of Cleaner Production*. v. 286, p. 124970, 2021.

Ministério de Minas e Energia (MME). **PNH2: Plano de trabalho trienal 2023-2025**. 2023. Disponível em: <<https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/PlanodeTrabalhoTrienalPNH2.pdf>> Acesso em: 19 mai. 2024.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). **World Population Prospects**. 2019. Disponível em: <https://population.un.org/wpp2019/>. Acesso em: 20 jul. 2024.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). **Sustainable Development Goals**. 2015a. Disponível em: <https://www.undp.org/sustainable-development-goals>. Acesso em: 25 jul. 2024.

PEDROZA, Eduardo; STURNIOLO, Alejandro; JOSÉ, Marcio. Hidrogênio verde e o papel do reuso e da dessalinização: as oportunidades na América Latina no desafio global de água e energia. 2022.

SANLI, A. E. *et al.* Investigation of the electro-oxidation of artificial Black Sea water using cyclic voltammetry on metal sulfide electrodes (I). *International Journal of Hydrogen Energy*. v. 39, ed. 14, p. 7236-7246, 2014.

Shiva Kumar, S. & Lim, H. An overview of water electrolysis technologies for green hydrogen production. *Energy Reports* 8, 13793–13813 (2022).

WEBSTER, J.; WATSON, J.T. Analyzing the past to prepare for the future: writing a literature review. *MIS Quarterly & The Society for Information Management*, v. 26, n. 2, pp.13-23, 2002.