

ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA DA PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO VERDE (2019-2023): ASPECTOS DE VIABILIDADE ECONÔMICA E TRANSIÇÃO ENERGÉTICA

EDUARDA GOMES DE SOUZA¹; EMANUÉLLE SOARES CARDOZO²; MAELE COSTA DOS SANTOS³; WILLIAN CÉZAR NADALETI⁴

¹Universidade Federal de Pelotas – gsduarda@gmail.com

²Universidade Federal de Pelotas – emanuellesoarescardozo@gmail.com

³Universidade Federal de Pelotas – maeledossantoseq@gmail.com

⁴Universidade Federal de Pelotas – williancezarnadaletti@gmail.com

1. INTRODUÇÃO

O hidrogênio (H₂) é um portador alternativo de energia que pode ser armazenado e transferido, possuindo alto poder calorífico, tornando-o adequado para substituir os combustíveis fósseis. O gás vem emergindo como um fator chave para atingir os objetivos de uma economia neutra em carbono (*net-zero*), haja vista que é considerada uma fonte de energia limpa, ou seja, com emissões de carbono quase nulas. Por isso, o combustível é considerado em planos energéticos de diversos países (KAKRAN *et al.*, 2023). Ainda, pode ser produzido a partir de diversas fontes, incluindo as renováveis como solar, eólica, hidráulica e biomassa, conhecido por hidrogênio verde (H₂V) (KANNAH *et al.*, 2021). Nesse sentido, a eletrólise da água constitui-se em uma tecnologia mais limpa para a produção de H₂V, principalmente partir das fontes solar e eólica, sendo tecnicamente madura e comercialmente disponível. O processo constitui-se na separação da molécula d'água (H₂O) em hidrogênio e oxigênio (O₂), utilizando uma corrente elétrica por meio de uma célula a combustível (IRENA, 2020). Nesse sentido, diversos estudos demonstraram a viabilidade de sistemas híbridos com sistemas combinados de energia solar fotovoltaica (FV), energia eólica, célula a combustível, eletrolisador e armazenamento de hidrogênio (MACEDO e PEYERL, 2022).

Ademais, a inserção de um combustível renovável e limpo na matriz energética impulsionaria uma economia circular e do H₂ âmbito nacional (NADALETI e LOURENÇO, 2021). Aliado a isso, a diversificação, descentralização e descarbonização da matriz energética do país são fundamentais para a melhoria da segurança, equidade e sustentabilidade ambiental dos sistemas energéticos, corroborando para acelerar a transição para uma economia de baixo carbono (HESS e LEE, 2020). Posto isso, o presente estudo tem como objetivo delinear um panorama das publicações nos últimos 5 anos (2019-2023), analisando o cenário atual acerca da produção científica relacionada à produção de hidrogênio verde.

2. METODOLOGIA

Neste estudo foi realizada uma revisão bibliométrica das publicações relacionadas à produção de hidrogênio verde, considerando os aspectos quantitativos da produção (MACIAS-CHAPULA, 1998). Assim, a coleta de dados seguiu-se com a utilização das informações disponibilizadas no banco de dados da Scopus da Editora Elsevier. A *string* de busca empregada foi: "*green hydrogen*" and "*energy transition*" and "*solar power*" ou "*wind power*" ou "*hybrid systems*" ou "*economic viability*". Ainda, buscando avaliar os documentos mais recentes, em relação ao período de análise, foram considerados apenas artigos publicados entre

janeiro de 2019 e setembro de 2023. O *software* livre VOSviewer versão 1.16 permitiu realizar a análise dos dados, através de partes da sequência definida como análise de citação, de co-citação, acoplamento bibliográfico e de redes de palavras-chave (ZUPIC e CATER, 2015). Dessa forma, foi possível a elaborar o mapa da rede de co-ocorrência de palavras-chave.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Ao todo, foram encontrados 733 documentos referentes ao tema de pesquisa. Logo, a Figura 1 ilustra o total de publicações de acordo com os anos selecionados e evidenciando os países com mais artigos publicados.

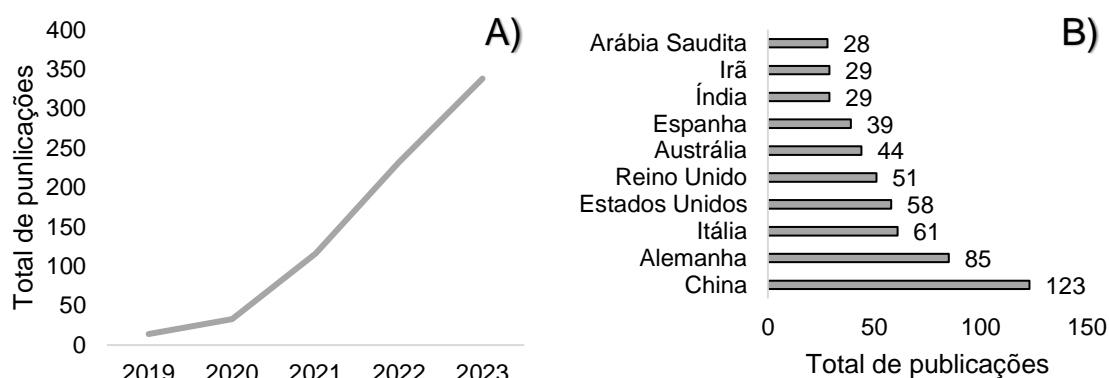


Figura 1. A) Número de artigos publicados entre 2019 e 2023. B) 10 países com o maior número de publicações relacionadas ao tema.

O ano de 2019 conta apenas com 14 publicações, enquanto em 2020 o volume de artigos aumenta para 33. Já em 2021 foram encontrados 116 documentos, com crescimento expressivo em 2022 e 2023, totalizando 232 e 338 artigos publicados, respectivamente (Figura 1A). Estes resultados demonstram um aumento de interesse de pesquisadores sobre o tema, principalmente nos últimos dois anos. Ainda, no que tange os países com maior quantidade de documentos, na Figura 1B destacam-se a China e a Alemanha, que somam 123 e 85 publicações ao total. No contexto nacional, o Brasil ocupou a 23ª posição com o equivalente a 13 publicações nos anos analisados.

Para alcançar as metas de redução de emissões, os países do Norte Global como a Alemanha estão incentivando a produção de H₂V em outros países com maior disponibilidade de recursos energéticos renováveis para posterior exportação. Atualmente, houve um aumento significativo na colaboração internacional, com ênfase no Brasil, Egito, Índia e Marrocos. As parcerias, lideradas por agentes governamentais e do setor privado, geralmente se constituem projetos-piloto, estudos de viabilidade e colaboração científica (LINDNER, 2023). À exemplo disso, o governo alemão, em parceria com o Ministério de Minas e Energia, introduziu a iniciativa H₂Brasil com o objetivo de promover inovações na cadeia de produção de H₂V (NETO, 2023). Até o momento, foram destinados aproximadamente a R\$ 193,5 milhões para apoiar essas iniciativas. No entanto, de acordo com Lindner (2023), essas parcerias existentes mostram deficiências, como a falta de considerações sociopolíticas e a priorização das metas econômicas em detrimento do desenvolvimento sustentável nos países parceiros.

Em sua totalidade, os resultados geraram 3 Clusters. A Figura 2 apresenta o mapa bibliométrico da co-ocorrência das palavras-chave selecionadas.

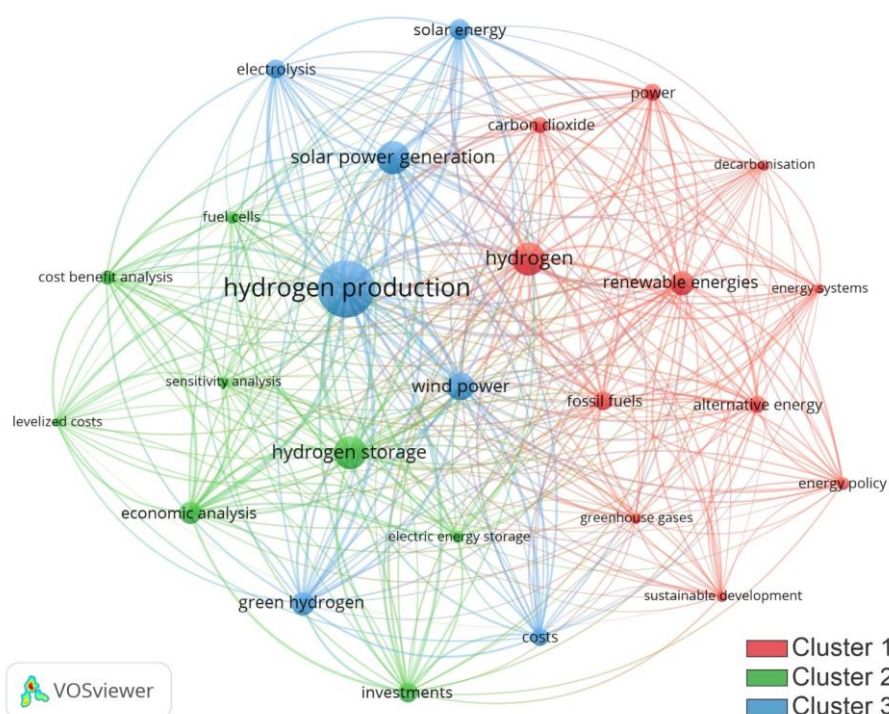


Figura 2. Mapa bibliométrico de co-ocorrência de palavras-chave.

No total, foram selecionadas 27 palavras-chave, considerando uma frequência mínima acima de cinco ocorrências, gerando 434 links com uma força de ligação de 8778. A palavra com maior correlação foi *hydrogen production* com 329 ocorrências. Desse modo, na Figura 2, é possível observar que o Cluster 1 compreende as palavras-chave correlacionadas à emissão de gases de efeito estufa, como o dióxido de carbono (CO₂), oriunda da utilização de combustíveis fósseis para geração de energia, assim como a descarbonização de sistemas energéticos através de fontes de energia alternativas e renováveis, incluindo ainda termos relacionados à política energética e desenvolvimento sustentável. Já o Cluster 2 abrange as questões relativas a análises econômicas como investimentos e custos nivelados, além de palavras como células a combustível e respectivo ao armazenamento de H₂. Por último, o Cluster 3 coloca em evidência a produção de hidrogênio verde através do uso de energia solar e eólica, incluindo a eletrólise da água.

O H₂V enfrenta diversas barreiras globais que dificultam a sua plena contribuição para a transição energética, tais como elevados custos de produção, falta de infraestrutura, perdas de energia, regimes fiscais, políticas de implantação, acordos comerciais e regulamentação financeira. Nasser e Hassan (2023) afirmam que o sistema FV com maior intensidade solar produz maior eficiência geral do sistema, densidade de produção de H₂ e densidade de energia elétrica com maior custo nivelado (LCOH) e tempo de *payback* mais longo em comparação com o sistema de turbinas eólicas em velocidades de vento mais altas. Os autores afirmam que os sistemas híbridos são recomendados para áreas com velocidade do vento e intensidade solar intermediária.

4. CONCLUSÕES

A análise bibliométrica apresentada demonstrou um crescimento em pesquisas relacionadas ao hidrogênio verde e a transição energética nos últimos cinco anos, principalmente no ano de 2023. Os resultados demonstraram que este aumento foi maior que 100% de 2019 a 2021 e igual a 45,68% entre 2022 a 2023. Além disso, é importante destacar que até o final do ano de 2023, a tendência de publicações relacionadas ao tema é de aumentar, haja vista que este ainda não se encerrou. Em relação às falhas no processo de transição energética e o aprimoramento de futuras parcerias, visando mitigar as mudanças climáticas e concomitantemente promover o desenvolvimento sustentável no Sul Global, uma transição energética considerando uma abordagem voltada para justiça energética é imprescindível. Por fim, ressalta-se que, apesar de constituir-se em um grande polo de geração de energias renováveis, o Brasil não se encontra entre os países com maior número de pesquisas voltadas para a produção de hidrogênio verde, considerando as variáveis determinadas.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- HESS, D. J.; LEE, D. Energy decentralization in California and New York: Conflicts in the politics of shared solar and community choice. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 121, p. 109716, 2020.
- IRENA (2020), **Green Hydrogen Cost Reduction: Scaling up Electrolysers to Meet the 1.50C Climate Goal**, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.
- KANNAH, R. Y. et al. Techno-economic assessment of various hydrogen production methods—A review. **Bioresource technology**, v. 319, p. 124175, 2021.
- KAKRAN, S. et al. Hydrogen energy in BRICS-US: A whirl succeeding fuel treasure. **Applied Energy**, v. 334, p. 120670, 2023.
- LINDNER, R. Green hydrogen partnerships with the Global South. Advancing an energy justice perspective on “tomorrow's oil”. **Sustainable Development**, v. 31, n. 2, p. 1038-1053, 2023.
- MACEDO, S. F.; PEYERL, D. Prospects and economic feasibility analysis of wind and solar photovoltaic hybrid systems for hydrogen production and storage: A case study of the Brazilian electric power sector. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 47, n. 19, p. 10460-10473, 2022.
- MACIAS-CHAPULA, C. A. O papel da Infometria e da Cientometria e sua perspectiva nacional e internacional. **Ciência da informação**, v. 27, n. 2, p. 134-140, 1998.
- NADALETI, W. C.; LOURENCO, V. A. A mathematical, economic and energetic appraisal of biomethane and biohydrogen production from Brazilian ethanol plants' waste: Towards a circular and renewable energy development. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 46, n. 54, p. 27268-27281, 2021.
- NASSER, Mohamed; HASSAN, Hamdy. Thermo-economic performance maps of green hydrogen production via water electrolysis powered by ranges of solar and wind energies. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 60, p. 103424, 2023.
- ZUPIC, I.; CATER, T. Bibliometric methods in management and organization. **Organizational research methods**, v. 18, n. 3, p. 429-472, 2015.
- NETO, João Sorima. **Alemanha amplia chances do Brasil no hidrogênio verde**. O Globo, São Paulo, 20 mar. 2023. Disponível em: <https://oglobo.globo.com/economia/noticia/2023/03/alemanha-amplia-chances-do-brasil-no-hidrogenio-verde.ghtml>. Acesso em: 20 ago. 2023.