

SUSTENTABILIDADE E DESAFIOS NA PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO: UMA ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA AVANÇADA

Batista Dala Catumba¹
Cláudia Elisa César Guimarães²
Pedro Tavares Borges³
Misael Bessa Sales⁴
José Cleiton Sousa Dos Santos⁵

RESUMO

O hidrogênio possui uma quantidade elevada e diversificada de matérias-primas, métodos e processos de melhoria para sua produção. Nos últimos anos, os estudos sobre a produção de hidrogênio vêm crescendo e se diversificando cada vez mais. A produção de hidrogênio pode ser baseada em matérias-primas renováveis, como biomassa ou combustíveis fósseis, como petróleo. Uma análise de 10.655 publicações do banco de dados Web of Science Core Collection (2010 a 2022) foi realizada usando VOSviewer, CiteSpace e Microsoft Excel. As três principais organizações que tiveram o maior número de publicações no campo da produção de hidrogênio incluíram a Academia Chinesa de Ciências, a Ontario Tech University e a Xi An Jiaotong University. O periódico com maior número de publicações é o International Journal Of Hydrogen Energy. Além de organizações e periódicos, foram analisados os autores e a literatura mais promissoras neste campo de pesquisa. Por meio da análise de agrupamento, verificou-se que dois campos de busca constantes foram a produção de hidrogênio fotocatalítico e a produção de hidrogênio fermentativo. Estudos futuros devem se concentrar no projeto do processo, produção contínua de foto-hidrogênio e vapor em loop. Este estudo bibliométrico faz parte do projeto de pesquisa com o título "As matérias-primas para a sustentabilidade e os desafios na produção de biodiesel: uma análise bibliométrica avançada", e se concentrou em ilustrar o panorama da pesquisa em produção de hidrogênio, realizando um levantamento sistemático de pesquisas atuais, que possam ser utilizadas por profissionais da indústria e pesquisadores interessados nesta área.

Palavras-chave: Produção de Hidrogênio; Matéria prima; Artigos de pesquisa; Análise Bibliométrica.

Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira, Engenharia de Energias, Discente, batistacatumba1999@hotmail.com¹

Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira, Engenharia de Energias, Discente, claudiaelisacg16@gmail.com²

Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira, Instituto de Engenharias e Desenvolvimento Sustentável, Discente, pupsborges12@gmail.com³

Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira, Engenharia de Computação, Discente, misaelbessa@aluno.unilab.edu.br⁴

Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira, Instituto de Engenharias e Desenvolvimento Sustentável, Docente, jcs@unilab.edu.br⁵

INTRODUÇÃO

O hidrogênio é o componente mais abundante de inúmeros compostos químicos presentes no universo. É essencial como combustível e para diversos processos químicos, como hidrocraqueamento, hidrogenação e hidrotratamento (BEHROOZSARAND; ZAMANIYAN; EBRAHIMI, 2010). A quantidade de substâncias dispostas na natureza que contêm hidrogênio é vasta, destacando-se a água que pode ser água do mar, chuva, poço ou água de rio. Além da água, o hidrogênio pode ser obtido a partir de hidrocarbonetos fósseis, sulfeto de hidrogênio, biomassa e outras substâncias. As formas de energia para extração de hidrogênio a partir das substâncias mencionadas acima podem ser divididas em quatro grupos: elétrica, térmica, bioquímica e fotônica.

O hidrogênio tem vários usos, sendo aplicado principalmente como substância química, como no melhoramento e dessulfuração de petróleo convencional (em refinarias de petróleo) e produtos químicos de produção (amônia, metanol e produtos farmacêuticos), e também aplicado como combustível (DINCER, 2012). Vários métodos de produção de hidrogênio têm acentuado as emissões de gases de efeito estufa. Anualmente, 70 milhões de toneladas de H₂ foram produzidas a partir de 75% de gás natural e 23% de carvão, o que faz com que a maior parte da produção tenha emissão de gases de efeito estufa (HURTUBIA; SAUMA, 2021).

Nos últimos anos, a atenção tem sido dada aos efeitos do aquecimento global e as questões relacionadas ao fornecimento de energia têm crescido em todo o mundo. O estado anormal do clima estava ligado ao aumento da concentração de gases de efeito estufa. Reduzir essas emissões de gases de efeito estufa é a principal preocupação ao lidar com anomalias climáticas (CHANG et al., 2011). Diante desse cenário, a obtenção de energia a partir de fontes renováveis tornou-se uma aliada essencial diante do aquecimento global, por isso a obtenção de hidrogênio por meio de “rotas verdes” tem despertado a atenção de diversos estudiosos interessados em pesquisas sobre produção de energia limpa.

A pesquisa sobre a produção de hidrogênio remonta ao início da década de 1950. No entanto, ainda sem se preocupar com métodos de produção ou poluição ambiental, as pesquisas mais antigas tratam das baixas temperaturas na produção de hidrogênio (IPATIEFF; MONROE; FISCHER, 1950). O aumento na pesquisa de produção de hidrogênio tem crescido significativamente nos últimos anos, passando de mais de 500 para 1.000 publicações por ano de 2010 a 2021, respectivamente. O aumento do interesse na área de produção de hidrogênio é notável. Embora a busca pelo título “Hydrogen Production” tenha resultado em 1251 publicações em 2021, acrescentando palavras-chave (“Bibliometr*” OR “Bibliometric Analysis” OR “Bibliometric map” OR “Scientometric*” OR “Research Trends” AND “Hydrogen Production”) na Web of Science resultou em apenas 1 publicação (ZHAO et al., 2020), ao pesquisar todos os campos pelas palavras-chave exatas, foram obtidos 61 resultados, sendo o primeiro publicado em 2005 (ANPO et al., 2005).

Neste estudo, foi realizada uma análise bibliométrica para avaliar 10.655 publicações da base de dados Web of Science (WoS), do ano de 2010 a 2022, para compreender os processos de desenvolvimento e as perspectivas futuras da pesquisa de produção de hidrogênio. A bibliometria avalia estudos de diferentes partes do mundo, instituições e autores com base no número total de citações, publicações, fator de impacto e vários outros parâmetros. Desempenha um papel essencial na ilustração da história de uma determinada área ou assunto, prevendo o futuro desta área e melhorando a comunicação entre os pesquisadores (HUANG et al., 2022).

METODOLOGIA

A base de dados Web of Science (WoS) (<https://www-webofscience.ez373.periodicos.capes.gov.br>) foi utilizada para realizar as análises bibliométricas deste artigo, por ser considerada uma ferramenta de alta qualidade e a mais útil para gerar dados de citação para pesquisa científica (HUANG et al., 2022). Inicialmente, "Hydrogen Production" foi usado no campo do título. O período foi definido do ano de 2010 a 2022 para focar nos avanços mais recentes da pesquisa. Além disso, o inglês foi escolhido como idioma e os tipos de documentos foram refinados para "artigos", "artigos de revisão" e "documentos de procedimento". Após o refinamento, foram obtidas 10.655 publicações para a análise bibliográfica, iniciando os downloads em 2 de fevereiro de 2022. A partir dessa base de dados inicial, foi possível criar mais duas bases de dados direcionadas para entender os rumos da pesquisa nessa área, no primeiro caso foi acrescentando o operador lógico "AND" e utilizando os seguintes termos de busca no campo palavra-chave mais: ("Biomass" OR "feedstock" OR "fóssil" OU "water"). No caso da segunda base de dados direcionada foi acrescentada o seguinte termo de busca à base de dados inicial: "waste". O software VOSviewer (versão 1.6.17) [www.vosviewer.com/], é um programa de computador disponível gratuitamente desenvolvido para auxiliar na visualização e construção de mapas bibliométricos. Foi utilizado para analisar os dados obtidos no WoS. As planilhas padrão do Microsoft Excel (Microsoft Office Professional Plus, 2019) também foram usadas para análise e catalogação de dados. Outro software utilizado foi o CiteSpace. Com este programa foi possível prever e identificar possíveis subáreas de investigação futura nesta área através de clusters e palavras-chave.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após a obtenção dos dados, as análises feitas forneceram informações que possibilitam compreender o estado bibliométrico da área de pesquisa. No total cerca de 1345 periódicos albergam as publicações selecionadas, distribuídas em 104 países. Foram identificados 23.986 autores para o total de trabalhos publicados (cerca de 2,2 autores por artigo). Esses dados também reforçam a alta dispersão de pesquisadores na área. Ao selecionar apenas autores com pelo menos 20 publicações e 800 citações, foram obtidos 27 autores. Dentre eles, destaca-se o Dincer I, com o número mais expressivo de publicações na área (234 documentos) e 8.416 citações. Autores com publicações e citações previamente determinadas não colaboram apenas com autores que possuem números de publicações e citações próximos aos seus. Espera-se que os grupos obtidos neste mapa sejam pequenos. No entanto, a curiosidade é que os autores formam pequenos grupos de um mesmo país. Um dos principais indicadores da relevância de uma publicação é a citação. Em primeiro lugar no ranking dos artigos mais citados está um artigo que relata a produção de hidrogênio por separação de água usando nanofolhas de grafeno como fotocatalisadores com o título "Highly Efficient Visible-Light-Driven Photocatalytic Hydrogen Production of CdS-Cluster-Decorated Graphene Nanosheets". É importante notar que os sete autores deste artigo são do mesmo país (China). A segunda publicação mais citada é uma revisão de literatura sobre o estado da tecnologia e conhecimento da produção de hidrogênio por eletrólise da água, apontando os pontos que precisam ser melhorados, o título do artigo é "Recent progress in alkaline water electrolysis for hydrogen production and applications". Esta revisão teve dois autores do mesmo país (Austrália) e obteve 1763 citações. O terceiro artigo mais citado obteve 1028 citações, seus quatro autores são do mesmo país (Suíça), e o título é "Amorphous molybdenum sulfide films as catalysts for electrochemical hydrogen production in water". Este artigo discute o uso do método eletroquímico de filmes de sulfeto de molibdênio como catalisadores para a produção de hidrogênio. Os artigos analisados sobre produção de hidrogênio estão agrupados em um total de 67 áreas de pesquisa na base de dados Web of Science, muitos artigos estão incluídos em mais de uma área de pesquisa, portanto existem mais de 30 áreas de pesquisa com menos de 10 artigos sobre produção de hidrogênio. Um detalhe

importante é que 6 principais áreas de pesquisa albergam 84% dos artigos publicados. Cerca de 6351 artigos foram registrados na área de pesquisa "Química". Em seguida, a área de pesquisa "Combustíveis energéticos", com 5.356 registros, "Eletroquímica", com 3173 registros, e "Engenharia" com 2.461 registros. A variedade de áreas de pesquisa nos mostra diversos atores na cadeia de conhecimento da produção de hidrogênio. Existe uma grande variedade de matérias-primas para a produção de hidrogênio. No entanto, eles podem ser classificados em 2 categorias, combustíveis fósseis e recursos renováveis (água, biomassa). É fundamental destacar que algumas matérias-primas de biomassa para a produção de bioenergia são cultivadas em larga escala em monoculturas. Isso acaba impactando a sociedade e o meio ambiente, como o aumento da competição por terras naturais e agrícolas, o impacto negativo na biodiversidade, a influência nos preços dos alimentos e o agravamento da escassez de água. Portanto, o uso de biomassa mais sustentável e menos competitiva, como resíduos de alimentos domésticos, resíduos de culturas, esterco de gado e biomassa aquática, está se tornando mais atraente. Para as matérias-primas comestíveis, apesar da alta competitividade, alguns exemplos podem ser citados, como palha de arroz, casca de arroz, talo de trigo, casca de amendoim, talo de milho, sabugo de milho e talo de sorgo. No caso de matérias-primas não comestíveis e biomassa aquática, alguns exemplos podem ser citados, como resíduos verdes (composto principalmente por grama, folhas e podas frescas provenientes de jardins e parques), serragem de madeira, *Chlorella sp.*, *Spirogyra sp.*, *Pistia stratiotes*, *Keratococcus*, *Oscillatoria*, *Microcystis wesenbergii*, *Microcystis aeruginosa*, *Arthrospira platensis*, *Eichhornia crassipes*, *Scenedesmus obliquus*, *Chlorella vulgaris* e *Spartina anglica*. Entre as matérias-primas observadas, as matérias-primas de água e biomassa são as mais relevantes dentre as 3.530 publicações localizadas na base de dados, sendo encontradas 2.867 publicações com a palavra-chave "water" e 823 publicações com a palavra-chave "Biomass". A palavra-chave "fossil" foi citada em apenas 25 publicações, e a palavra-chave menos citada foi "feedstock", com 11 citações.

CONCLUSÕES

Neste artigo, foi realizada uma ampla análise da literatura relacionada à produção de hidrogênio, aprofundando as tendências emergentes que são analisadas nos trabalhos atuais e as alternativas promissoras que podem ser estudadas no futuro. Este estudo analisou e avaliou um conjunto de 10.655 publicações que foram publicadas entre 2010-2022 na base de dados WoS com o auxílio de três ferramentas diferentes (VoSviewer, CiteSpace e Microsoft Excel). A partir dessa base de dados inicial, foi possível criar mais duas bases de dados direcionadas de 3530 e 529 artigos respectivamente, para entender os rumos da pesquisa nessa área. Esta pesquisa pode ser usada por pesquisadores interessados na produção de hidrogênio, fornecendo direções de pesquisa relevantes. Observou-se que a China, Estados Unidos da América e Coreia do Sul produziram a maior quantidade de publicações entre todos os países/regiões envolvidos em pesquisas sobre produção de hidrogênio. A microalga foi uma das matérias-primas destacadas neste trabalho, esta matéria-prima recebeu pouca atenção na literatura devido ao número de artigos que mencionam esta matéria-prima ser muito reduzida, apesar do enorme potencial e vantagens de sustentabilidade que apresenta. Isso porque é uma área de pesquisa recente e normalmente matérias-primas exploradas há muito tempo tornam-se mais interessantes devido à quantidade de informações disponíveis. Os tópicos de pesquisa foram identificados a partir de uma perspectiva de palavras-chave. Da análise de todas as palavras-chave, destacam-se os seguintes temas: produção de hidrogênio, hidrogênio, água, desempenho, geração, evolução e biohidrogênio. No que concerne as organizações, a Academia Chinesa de Ciências é a

organização no centro das 4.089 organizações envolvidas na pesquisa sobre produção de hidrogênio, tendo produzido o maior número de publicações, seguida pela Universidade Xi An Jiaotong. Apesar de um grande número de matérias-primas e métodos de produção conhecidos, ainda existe uma grande preocupação por parte dos pesquisadores em relação ao baixo rendimento de hidrogênio que algumas matérias-primas apresentam, a eficiência durante os processos de produção de hidrogênio, a melhoria dos métodos existentes, e principalmente a dificuldade de utilização de algumas matérias-primas, métodos ou processos na produção de hidrogênio em larga escala.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos primeiramente à Deus, à Universidade, ao IEDS e ao nosso orientador, Prof. Dr. José Cleiton Sousa dos Santos. Agradecemos também as seguintes Agências Brasileiras de Desenvolvimento Científico e Desenvolvimento Tecnológico: Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FUNCAP) (PS1-0186-00216.01.00/21; PS1-00186-00255.01.00/21), Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) (311062/2019-9; 308280/2017-2; 313647/2020-8), e Coordenação de Aperfeiçoamento de Ensino Superior (CAPES) (código financeiro 001).

REFERÊNCIAS

1. ANPO, M. et al. The preparation and characterization of highly efficient titanium oxide-based photofunctional materials. *Annual Review of Materials Research*, v. 35, 2005.
2. BEHROOZSARAND, A.; ZAMANIYAN, A.; EBRAHIMI, H. Industrial hydrogen production and CO₂ management. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, v. 2, n. 4, 2010.
3. CHANG, A. C. C. et al. Biomass gasification for hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*. Anais...2011.
4. DINCER, I. Green methods for hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*. Anais...2012.
5. HUANG, T. et al. Visualized Analysis of Global Studies on Cervical Spondylosis Surgery: A Bibliometric Study Based on Web of Science Database and VOSviewer. *Indian Journal of Orthopaedics*, v. 56, n. 6, 2022.
6. HURTUBIA, B.; SAUMA, E. Economic and environmental analysis of hydrogen production when complementing renewable energy generation with grid electricity. *Applied Energy*, v. 304, 2021.
7. IPATIEFF, V. N.; MONROE, G. S.; FISCHER, L. E. Low Temperature Hydrogen Production. *Industrial & Engineering Chemistry*, v. 42, n. 1, 1950.
8. ZHAO, N. et al. Bibliometric and content analysis on emerging technologies of hydrogen production using microbial electrolysis cells. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2020.