

Uma análise bibliométrica sobre eletrolise PEM ou alcalina para a produção de hidrogênio baseada na Scopus

Carla Freitas de Andrade¹

Mona Lisa Moura de Oliveira²

Francisco Olímpio Moura Carneiro³

André Valente Bueno⁴

Alexandre Sales Costa⁵

Resumo

O hidrogênio verde tem se tornado o centro das atenções no cenário mundial uma vez que permite a obtenção de calor, para diversos fins, sem a geração de gases indesejáveis. Logo, cada vez mais estudos estão relacionados a este tema haja vista são muitos os desafios da produção verde e da forma e meios de uso. Para a produção desse hidrogênio, uma técnica necessária é a eletrolise da água que pode ocorrer pelo método PEM ou alcalino. Este artigo busca avaliar as tendências das publicações na área da eletrólise PEM ou alcalina para a produção do hidrogênio a fim de fazer essa análise no espectro das publicações voltado tanto para o contexto mundial quanto para o contexto nacional, sendo possível analisar os artigos com mais citações, as instituições mais relevantes, que países vêm trabalhando na área, quais revistas produzem sobre este assunto, além de observar que lacunas precisam ser mais preenchidas com estudos e pesquisas. Para tal finalidade, fez-se uso da base Scopus considerando algumas palavras chaves, como ("*alkaline electrolysis*" or "*electrolysis alkaline*" or "*PEM electrolysis*" or "*electrolysis PEM*" and "*hydrogen*") e, posteriormente, foi feita análise dos dados dos documentos encontrados no Bibliometrix. O objetivo do presente trabalho trata de identificar a evolução do tema e mostrar a posição do Brasil no cenário mundial.

Palavras-chave: Hidrogênio Verde; Bibliometrix; Análise Bibliométrica; Eletrólise PEM, Eletrólise Alcalina.

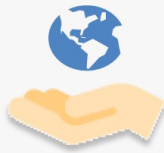
¹Brasil, Universidade Federal do Ceará, Professora, carla@ufc.br, <http://orcid.org/0000-0003-1403-1994>, <http://lattes.cnpq.br/1903591824850643>.

²Brasil, Universidade Estadual do Ceará, Professora, mona.lisa@uece.br, <https://orcid.org/0000-0001-9301-4134>, <http://lattes.cnpq.br/8485796147369478>

³Brasil, UNILAB, Professor, olimpio@unilab.edu.br, <http://orcid.org/000-0001-5432-2521>, <http://lattes.cnpq.br/2364823409007529>

⁴Brasil, Universidade Federal do Ceará, Professor, bueno@ufc.br, <https://orcid.org/0000-0001-5083-5872>, <http://lattes.cnpq.br/7255751296587016>

⁵Brasil, Universidade Federal do Ceará, Estudante de graduação, alexandrescosta@alu.ufc.br, <https://orcid.org/0009-0005-2410-8125>, <http://lattes.cnpq.br/8408687443032115>



A bibliometric review of PEM or alkaline electrolysis for hydrogen production based on Scopus

Abstract

Green hydrogen has become the center of attention on the world stage, since it allows the production of heat for various purposes without generating undesirable gases. Therefore, more and more studies are related to this topic, given the many challenges of green production and the forms and means of its use. For the production of this hydrogen, a necessary technique is water electrolysis, which can occur using the PEM or alkaline method. This article seeks to evaluate the trends in publications in the area of PEM or alkaline electrolysis for hydrogen production in order to carry out this analysis in the spectrum of publications focused on both the global and national contexts. It is possible to analyze the articles with the most citations, the most relevant institutions, which countries have been working in the area, which journals produce on this subject, in addition to observing which gaps need to be filled with more studies and research. For this purpose, the Scopus database was used considering some key words, such as ("alkaline electrolysis" or "electrolysis alkaline" or "PEM electrolysis" or "electrolysis PEM" and "hydrogen") and, subsequently, the data from the documents found in Bibliometrix was analyzed. The objective of this work is to identify the evolution of the theme and show Brazil's position in the world scenario.

Keywords: Green Hydrogen; Bibliometrix; Bibliometric Analysis; PEM Electrolysis; Alkaline Electrolysis.

Recebido em: 05/08/2024

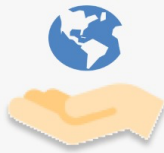
Aceito em: 21/10/2024

Publicado em: 24/10/2024

1 Introdução

A produção do hidrogênio através da decomposição da água é uma das formas mais limpas de produção do hidrogênio verde, uma vez que, a eletricidade necessária advém de uma fonte renovável de energia. Além disso, o processo de eletrólise da água ocorre nos chamados eletrolisadores que são classificados de acordo com o eletrólito que podem ser eletrolisadores alcalinos ou eletrolisadores de membrana de troca de prótons (PEM), entre outros.

O eletrolisador do tipo alcalino (AEL) tem seu princípio de funcionamento baseado em eletrólitos de hidróxido de potássio (KOH) ou hidróxido de sódio (NaOH) (ZENG; ZHANG, 2010). O ânodo e o cátodo, imersos no eletrólito líquido que geralmente é uma solução concentrada de KOH, são separados por um diafragma, e o processo se inicia no cátodo (URSUA; GANDIA; SANCHIS, 2012; VIDAS; CASTRO, 2021).



Segundo (PALHARES, 2016), o eletrolisador do tipo PEM pode ser chamado de três formas: membrana polimérica de próton (Proton Exchange Membrane), membrana de troca de prótons e polímero de eletrólito sólido (Solid Polymer Electrolyte). Esse modelo de eletrolisador possui um eletrólito sólido, que é uma membrana polimérica podendo ser feita de Nafion, um polímero sulfonado (BARBIR, 2005a).

Nesse sentido, o presente artigo tem como objetivo realizar uma análise bibliométrica sobre a produção científica relacionada à eletrolise PEM e alcalina na produção do hidrogênio, utilizando a base de dados Scopus e a ferramenta do Bibliometrix.

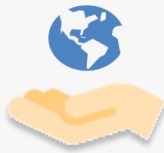
A análise bibliométrica permite identificar tendências, padrões e lacunas na produção científica sobre o assunto, além de fornecer informações relevantes para investimentos em pesquisa e desenvolvimento nessa área. Alguns artigos, tais como (DONTHU et al., 2021) e (ARIA; CUCCURULLO, 2017), foram utilizados para embasar a metodologia bibliométrica, observando as diferentes técnicas e orientações para realizar uma análise bibliométrica confiável.

Por meio da análise dos dados, é possível compreender melhor a evolução da produção científica sobre tipos de eletrólise, identificando as principais instituições e grupos envolvidos, entre outras informações relevantes. A partir desses resultados, espera-se contribuir para o avanço do conhecimento científico sobre o tema e para o desenvolvimento de tecnologias voltadas para o estudo da eletrólise e contribuir também em pesquisas na área de hidrogênio, em especial no hidrogênio verde, gerado por fontes renováveis, o que contribui para a descarbonização, podendo gerar impacto positivo na sociedade.

2 Metodologia

A extração de dados científicos para esse estudo foi realizada usando o banco de dados Scopus em junho de 2023. Scopus é uma ferramenta aceita para extração de dados e pesquisa científica e que foi utilizada como referência, por conter grande número de artigos. O estudo visa mapear as tendências na área de eletrólise. A literatura foi pesquisada considerando todos os anos possíveis, usando as opções de pesquisa avançada “título, resumo e palavras-chave”.

A bibliometria ajuda a entender as tradições de pesquisa, empregando citações, refinamentos e a mapear clusters, indicando as redes de pesquisas. Para compilar os dados e fazer uma análise das informações, foi utilizada a ferramenta do Bibliometrix (<https://www.bibliometrix.org/>), um software livre escrito em linguagem R (ARIA; CUCCURULLO, 2017).



O tipo de busca aplicado foi “pesquisa avançada”, e utilizou-se os termos ("*alkaline electrolysis*" or "*electrolysis alkaline*" or "*PEM electrolysis*" or "*electrolysis PEM*" and "*hydrogen*") juntos, encontrando 624 documentos, e ao se aplicar um refinamento, filtrando os documentos para “artigo e revisão”, Língua Inglesa, estágio de publicação final, tipo de fonte Jornal, ficou-se com apenas 410 documentos.

A busca sistemática foi realizada durante todo o período, sem restrição de tempo de publicação, com base na base de dados Scopus, durante a segunda semana de junho de 2023, procurando por manuscritos publicados em periódicos indexados para melhor entender o estado atual da pesquisa científica em relação ao tema. A segunda semana de junho foi registrada como a data da pesquisa porque o número de artigos pode ter mudado ao longo do tempo à medida que artigos adicionais foram publicados. Os dados foram obtidos no formato .bib, e analisados em software bibliométrico. O pacote “Bibliometrix” (linguagem R) foi usado para obter gráficos, tabelas e diagramas.

O principal objetivo deste estudo é fornecer uma visão sobre trabalhos que abordem sobre eletrolisadores PEM ou alcalinos e a relação com o hidrogênio, compreendendo a natureza das publicações mais citadas, e mostrar a posição do Brasil no cenário mundial.

Os parâmetros utilizados na busca estão discriminados na Tabela 1.

Tabela 1: Escopo, banco de dados, termos e filtros referentes à análise bibliométrica realizada com o Bibliometrix (DONTU et al., 2021)

| Banco de Dados | Termos Pesquisados | Filtros inseridos | Quantidade de documentos (Contexto Mundial e Nacional) |
|----------------|--|--|--|
| Scopus | " <i>alkaline electrolysis</i> " or " <i>electrolysis alkaline</i> " or " <i>PEM electrolysis</i> " or " <i>electrolysis PEM</i> " and " <i>hydrogen</i> " | Documentos: Artigos científicos e Revisão Tipo de Fonte: Journal Língua: Inglesa | 410 |
| | | Documentos: Artigos científicos e Revisão Tipo de Fonte: Journal Língua: Inglesa País: Brasil | 4 |

Fonte: Base Scopus, Jun.2023

A Tabela 2 mostra as principais informações obtidas no Biblioshiny, considerando o conjunto de documentos a ser trabalhado.

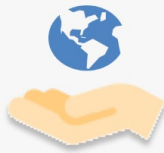


Tabela 2: Principais informações sobre os dados gerados pelo *Bibliometrix*.

| Descrição | Resultados |
|-----------------------------------|-------------------|
| INFORMAÇÕES SOBRE OS DADOS | |
| Intervalo de tempo | 1978:2023 |
| Fontes (Revistas, livros, etc.) | 121 |
| Quantidade de documentos | 410 |
| Anos médios de publicação | 5,1 |
| Média de citações por documentos | 45,32 |
| TIPOS DE DOCUMENTOS | |
| Artigos científicos | 379 |
| Artigos de revisão | 31 |
| Total de autores | 1624 |
| Co-autores por documentos | 5,04 |

Fonte: Base *Scopus*, ferramenta *Bibliometrix*, Jun, 2023

A Tabela 2 mostra que fazem parte do conjunto a ser analisado, 410 documentos que estão distribuídos em 121 revistas, sendo publicados no período entre 1978 e 2023.

Diante do conjunto de documentos, pode-se agora analisar esses dados utilizando a ferramenta do *Bibliometrix* e verificar diversos parâmetros que possam contribuir para um mapeamento científico do assunto eletrolisadores.

3 Análise Bibliométrica

As análises contempladas neste estudo consideraram o contexto mundial e, posteriormente, o contexto nacional brasileiro.

As análises bibliométricas são especialidades científicas e um aspecto significativo da avaliação da pesquisa, especialmente nos setores científico e aplicado (LAENGLER et al., 2017). Este estudo bibliométrico, utilizando a base *Scopus*, foi realizado na segunda semana de junho de 2023, onde, após a utilização de filtros, chegou-se a 410 documentos, publicados desde 1978. Todos os artigos foram baseados em artigos de periódicos e 100% foram publicados em inglês.

3.1 Tendência de Publicação

A Figura 1 mostra a tendência da pesquisa e a evolução das publicações entre 1978 e a segunda semana de junho de 2023. Até 2005 somente 15 artigos nessa linha de pesquisa tinham sido publicados. No geral, o número de artigos produzidos a cada ano devido à triagem principal da base de dados escolhida aumentou, como pode ser visto no gráfico, e claro, que à medida que o número de artigos aumenta, também aumenta o número de pesquisadores com interesses de pesquisa.

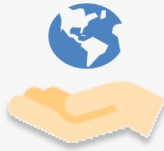
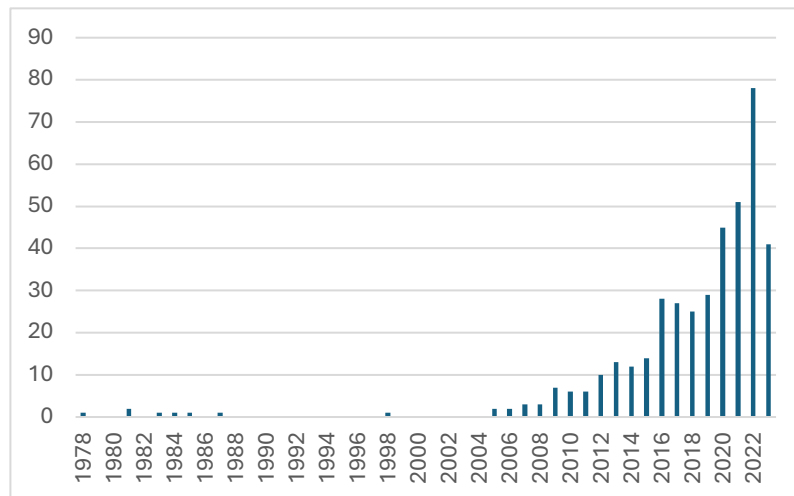


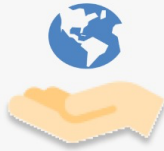
Figura 1. Quantidade de artigos ao longo dos anos



Até o ano de 2005 não existia uma constância nas publicações. Em 1978 teve uma publicação (LASKIN, 1978), em 1981, tiveram duas publicações (BAILLEUX, 1981; HALL, 1981), em 1983, 1984 e 1985 teve uma em cada um desses anos (AUREILLE; POTTIER, 1984; LEROY, 1983; ROMMAL; MORAN, 1985), em 1987 outra única publicação (CORRIGAN, 1987a). Só foi ter outra em 1998 (RIEGEL; MITROVIC; STEPHAN, 1997), e finalmente em 2005 teve duas publicações nesse ano (BARBIR, 2005b; STOJIC et al., 2005) e passou a ter uma periodicidade nessas publicações, onde em 2020, começou a ter um aumento considerável de artigos abordando o tema o que pode ser justificado pelo interesse no hidrogênio verde, já que o eletrolisador será o equipamento que irá fazer a separação das moléculas de hidrogênio e oxigênio.

Em 2020, o cenário já muda bastante, pois já se tem 45 publicações e até junho de 2023, já se conta com 41, mostrando a tendência de crescimento dessa área de pesquisa. Esse aumento está relacionado a questão da visibilidade que o hidrogênio verde vem tendo devido à preocupação com a descarbonização. O ano de 2022 teve 78 publicações, correspondendo a quase 20% de todas as publicações.

Dentre os trabalhos mais recentes, pode-se citar o trabalho de (ZHAO et al., 2023) que propõe um sistema combinado de hidrogênio, aquecimento e energia baseado em energia solar para a aplicação fora da rede de energia renovável distribuída e faz uma análise integrando eletrólise de água alcalina (AWE), armazenamento de hidrogênio de hidreto metálico (MH) e células de combustível de membrana de troca de prótons (PEMFCs). Já no trabalho de



(GERLOFF, 2023) fizeram uma investigação com diferentes tecnologias de eletrólise da água e cenários energéticos.

3.2 Artigos mais citados

A crescente demanda por energia torna necessária a busca por fontes de energia renováveis e a modernização dos sistemas energéticos para atender às necessidades energéticas recentes e futuras (ABDIN et al., 2020). Artigos experimentais e revisões mais citados são importantes no conhecimento do assunto a ser tratado. Sendo assim, o Quadro 1 enumera os 15 artigos mais citados nesse conjunto de documentos selecionados com maior número de citações.

Dos artigos mais citados foram extraídas as seguintes informações: i) Nome do primeiro autor referência do artigo; ii) Título do artigo; iii) Total de citação por artigo; iv) Periódico que publicou; v) ano em que o artigo foi publicado e vi) o país do primeiro autor.

O Quadro 1 mostra os 15 artigos mais citados, informando o nome do primeiro autor, a citação do trabalho, título do artigo, total de citações, a revista em que foi publicado, o ano de publicação e o país do primeiro autor.

Quadro 1: Os top 15 de artigos em número de citações

| | AUTOR / CITAÇÃO | TÍTULO | TC | REVISTA | ANO | PAIS |
|---|---|--|------|---|------|----------------|
| 1 | CARMO M (CARMO et al., 2013) | A comprehensive review on PEM water electrolysis | 2946 | International Journal of Hydrogen Energy | 2013 | Alemanha |
| 2 | Frano Barbir (BARBIR, 2005a) | PEM electrolysis for production of hydrogen from renewable energy sources | 833 | Solar Energy | 2005 | Estados Unidos |
| 3 | Dennis A. Corrigan (CORRIGAN, 1987b) | The Catalysis of the Oxygen Evolution Reaction by Iron Impurities in Thin Film Nickel Oxide Electrodes | 702 | Journal of The Electrochemical Society | 1897 | Estados Unidos |
| 4 | Foteini M. Sapountzi (SAPOUNTZI et al., 2017) | Electrocatalysts for the generation of hydrogen, oxygen and synthesis gas | 407 | Progress in Energy and Combustion Science | 2017 | Holanda |
| 5 | Stefania Marini (MARINI et al., 2012) | Advanced alkaline water electrolysis | 373 | Italy | 2012 | Itália |
| 6 | Wei Yan (YAN; WANG; BOTTE, 2012) | Nickel and cobalt bimetallic hydroxide catalysts for urea electro-oxidation | 260 | Electrochimica Acta | 2012 | Estados Unidos |
| 7 | Martín David (DAVID; OCAMPO-MARTÍNEZ; SÁNCHEZ-PEÑA, 2019) | Advances in alkaline water electrolyzers: A review | 259 | Journal of Energy Storage | 2019 | Argentina |
| 8 | Sayed M. Saba (SABA et al., 2018a) | The investment costs of electrolysis – A comparison | 248 | International Journal of Hydrogen Energy | 2018 | Alemanha |



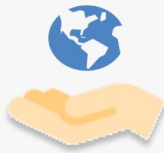
| | AUTOR / CITAÇÃO | TÍTULO | TC | REVISTA | ANO | PAIS |
|----|--|--|-----|--|------|-------------|
| | | of cost studies from the past 30 years | | | | |
| 9 | Hamish Andrew Miller (MILLER et al., 2020) | Green hydrogen from anion exchange membrane water electrolysis: a review of recent developments in critical materials and operating conditions | 234 | Sustainable Energy & Fuels | 2020 | Reino Unido |
| 10 | Yibing Li (LI; ZHAO, 2016) | Iron-Doped Nickel Phosphate as Synergistic Electrocatalyst for Water Oxidation | 233 | Chem. Mater. | 2016 | Australia |
| 11 | Hiroshi Ito (ITO et al., 2011) | Properties of Nafion membranes under PEM water electrolysis conditions | 206 | International Journal of Hydrogen Energy | 2011 | Japão |
| 12 | Ahmadi, Pouria (AHMADI; DINCER; ROSEN, 2013) | Energy and exergy analyses of hydrogen production via solar-boosted ocean thermal energy conversion and PEM electrolysis | 205 | International Journal of Hydrogen Energy | 2013 | Canadá |
| 13 | Dr. Claudiu C. Pavel (PAVEL et al., 2014) | Highly Efficient Platinum Group Metal Free Based Membrane-Electrode Assembly for Anion Exchange Membrane Water Electrolysis | 203 | Wiley Online Library | 2014 | Itália |
| 14 | Maximilian Schalenbach (SCHALENBACH et al., 2013a) | Pressurized PEM water electrolysis: Efficiency and gas crossover | 199 | International Journal of Hydrogen Energy | 2013 | Alemanha |
| 15 | N. Mamaca (MAMACA et al., 2012) | Electrochemical activity of ruthenium and iridium based catalysts for oxygen evolution reaction | 197 | Applied Catalysis B: Environmental | 2012 | França |

Note: O nome e país listado nesse quadro corresponde ao primeiro autor de cada artigo

A revista que mais recebeu publicação na área, foi a revista “*International Journal of Hydrogen Energy*”, recebendo 5 dos 15 documentos mais citados nesse conjunto de dados, e sendo também a revista que mais recebeu citação.

Inúmeros fatores contribuem para o rápido crescimento que vem ocorrendo em relação a quantidade de publicações relacionadas com eletrolisadores. Em primeiro lugar, o interesse pelo hidrogênio verde como uma alternativa para a descarbonização.

Dentre os trabalhos mais citados, pode-se citar o trabalho de (CARMO et al., 2013) que já teve mais de 2.900 citações e discute a eletrolise PEM da água mostrando o estado da arte e as pesquisas já realizadas. O trabalho de (BARBIR, 2005a), que já teve mais de 800 citações,



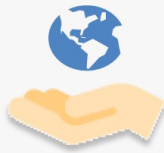
fala que a eletrólise PEM é uma alternativa viável para a geração de hidrogênio a partir de fontes renováveis de energia, e discute as várias aplicações possíveis, abordando sobre o uso do eletrolisador PEM nos sistemas de energia renovável. Já (CORRIGAN, 1987b), atingindo mais de 700 citações, fez um estudo para produzir hidrogênio.

Os autores (SAPOUNTZI et al., 2017) abordam sobre a eletrólise da água que é um método promissor para a produção eficiente de hidrogênio (e oxigênio) de alta pureza, enquanto a entrada de energia necessária para o processo de eletrólise pode ser fornecida por fontes renováveis. E (MARINI et al., 2012) fizeram uma breve revisão sobre as questões fundamentais e tecnológicas relevantes para a eletrólise da água em dispositivos alcalinos e de membrana de troca de prótons (PEM).

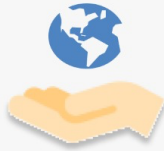
3.3 Desempenho das Revistas

Um total de 121 fontes tem publicações sobre o assunto, obtendo uma média de 8,6 documentos por ano. O Quadro 2 mostra uma lista dos dez melhores periódicos para publicar um tópico sobre eletrolise, isto é, as revistas científicas de mais destaque, de acordo com o número de publicações na área pesquisada. Fator de impacto, h-index, Total de Publicações são métricas de periódicos que ajudam a medir o impacto da citação e o crescimento dos periódicos (BORNMANN; DANIEL, 2007; GHAZINOORY; AMERI; FARNOODI, 2013; KAR; HARICHANDAN; ROY, 2022). Fazendo uma análise quantitativa das publicações desses 10 periódicos, observa-se que eles concentram mais de 56% do total de publicações identificadas.

Um total de 115 documentos, que corresponde a 28% do total de artigos publicados considerando esse conjunto de dados, foi publicado na Revista *International Journal of Hydrogen Energy*, tendo recebido um total de mais de 7.000 citações e tem um fator de impacto de 4,672, além disso foi a revista que teve a primeira publicação nessa área considerando o conjunto analisado. Posteriormente, aparece em segundo lugar, mas com uma frequência de publicação bem menor, a revista *Journal of Power Sources*, com 21 documentos (5,12%).

**Quadro 2.** As revistas que mais têm publicação nesse conjunto de dados analisados.

| | FONTES | ARTIGOS (TP) | h_index | TC | Fator de impacto (IF) | Evolução |
|---|--|---------------------|----------------|-----------|------------------------------|-----------------|
| 1 | INTERNATIONAL JOURNAL OF HYDROGEN ENERGY | 115 | 39 | 7901 | 4,672 | |
| 2 | JOURNAL OF POWER SOURCES | 21 | 16 | 668 | 9,794 | |
| 3 | JOURNAL OF THE ELECTROCHEMICAL SOCIETY | 19 | 11 | 1189 | 4.386 | |
| 4 | ELECTROCHIMICA ACTA | 14 | 11 | 1039 | 7,336 | |
| 5 | ENERGIES | 14 | 5 | 94 | 3,252 | |
| 6 | APPLIED ENERGY | 13 | 7 | 313 | 11,446 | |



| | | | | | | |
|----|---|----|---|-----|------------|--|
| 7 | ENERGY CONVERSION AND MANAGEMENT | 13 | 9 | 437 | 11,53 3 | |
| 8 | APPLIED CATALYSIS B: ENVIRONMENTAL | 8 | 7 | 487 | 24,31 9 | |
| 9 | ENERGY | 8 | 7 | 205 | 8,857 | |
| 10 | JOURNAL OF APPLIED ELECTROCHEMISTR Y | 6 | 4 | 125 | 2,925 | |

Nota: TPs = Total de Publicações; Pr(%) = Proporção; TC = Total de Citações; IF = Fator de Impacto em 2023; AC = Média Citação = TC/TPs;

Dentre os trabalhos da revista Revista International Journal of Hydrogen Energy, pode-se citar o trabalho de (CARMO et al., 2013) que foi o que teve maior número de citações em todo o conjunto de documentos analisados. O trabalho de (SABA et al., 2018a) teve 248 citações e fala que os custos de investimento da eletrólise da água representam um desafio para um sistema de energia baseado em hidrogênio. Os autores (ITO et al., 2011) relataram em seu trabalho, que já teve 206 citações, uma visão para ajudar a avaliar eletrolisadores PEM.



3.4 Desempenho das Instituições

Com relação ao desempenho das instituições, as 15 instituições mais produtivas, ou seja, que mais desenvolveram artigos na área considerada, estão listadas no Quadro 3, juntamente com a quantidade de artigos ligados a elas, o país ou região onde estão localizadas e a porcentagem que cada uma representa diante da quantidade global de publicações, além da evolução das publicações para cada instituição considerada.

Quadro 3. As 15 instituições que mais tem trabalhos na área e onde se localizam.

| INSTITUIÇÕES | ARTIGOS | PAIS OU LOCALIZAÇÃO | PERCENTAGEM | EVOLUÇÃO |
|---|---------|---------------------|-------------|----------|
| FORSCHUNGSZENTRUM JÜLICH GMBH | 14 | Alemanha | 3,41% | |
| RWTH AACHEN UNIVERSITY | 13 | Alemanha | 3,17% | |
| UNIVERSITY OF STUTT GART | 11 | Alemanha | 2,68% | |
| UNIVERSITY OF BELGRADE | 10 | Sérvia | 2,44% | |
| FRAUNHOFER INSTITUTE FOR MANUFACTURING TECHNOLOGY AND ADVANCED MATERIALS IFAM | 8 | Alemanha | 1,95% | |



| | | | | |
|--|---|---------------|-------|--|
| INSTITUTE OF ENGINEERING THERMODYNAMICS | 7 | Alemanha | 1,71% | |
| NORTH-WEST UNIVERSITY | 7 | África do Sul | 1,71% | |
| CLAUSTHAL UNIVERSITY OF TECHNOLOGY | 6 | Alemanha | 1,46% | |
| NORWEGIAN UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY | 6 | Noruega | 1,46% | |
| TSINGHUA UNIVERSITY | 6 | China | 1,46% | |
| UNIVERSITY OF CRETE | 6 | Grécia | 1,46% | |
| ADANA ALPARSLAN TURKES SCIENCE AND TECHNOLOGY UNIVERSITY | 5 | Turquia | 1,22% | |
| CNR-ITAE | 5 | Itália | 1,22% | |



| | | | | |
|---------------------------------|---|-----------|-------|--|
| NATIONAL CENTRAL UNIVERSITY | 5 | Taiwan | 1,22% | |
| TECHNICAL UNIVERSITY OF DENMARK | 5 | Dinamarca | 1,22% | |

A Universidade FORSCHUNGSZENTRUM JÜLICH GMBH, na Alemanha, lidera com 14 documentos, correspondendo a 3,41% das publicações gerais. Dentre as 20 instituições com mais publicações, a maioria concentra-se na Alemanha. A Alemanha ocupa os 3 primeiros lugares. E dentre as 20 primeiras instituições, a Alemanha aparece em 7 posições, somando 14,39% do total de publicações.

Dentre artigos da “FORSCHUNGSZENTRUM JÜLICH GMBH” pode-se citar o trabalho de (RAULS et al., 2023), de 2023 e com 2 citações. Tem também o (CALNAN et al., 2022), que foi em 2022 e já tem 12 citações. Além do trabalho de (SABA et al., 2018b) com 248 citações, o trabalho de (SCHALENBACH et al., 2013b) com 199 citações e o trabalho de (CARMO et al., 2013) com 2.946 citações.

3.5 Quantidade de artigos por países

O mapeamento da rede de países e territórios, juntamente com suas publicações e análises de citações, são exibidos na Tabela 3. A Tabela 3 mostra a quantidade de documentos por países levando em conta não somente os autores correspondentes, mas qualquer autor que esteja na publicação.

Tabela 3. Quantidade de artigos por país e a quantidade de citações dos países.

| RANK | PAÍS | ARTIGOS | TOTAL DE CITAÇÕES | PERCENTUAL |
|------|----------------|---------|-------------------|------------|
| 1 | ALEMANHA | 165 | 5078 | 40,24% |
| 2 | CHINA | 91 | 697 | 22,20% |
| 3 | ESTADOS UNIDOS | 85 | 3264 | 20,73% |
| 4 | FRANÇA | 56 | 976 | 13,66% |
| 5 | ESPANHA | 52 | 819 | 12,68% |
| 6 | ITÁLIA | 48 | 1474 | 11,71% |



| RANK | PAÍS | ARTIGOS | TOTAL DE CITAÇÕES | PERCENTUAL |
|------|---------------|---------|-------------------|------------|
| 7 | CORÉIA DO SUL | 45 | 156 | 10,98% |
| 8 | PERU | 33 | 303 | 8,05% |
| 9 | CANADÁ | 30 | 780 | 7,32% |
| 10 | REINO UNIDO | 30 | 418 | 7,32% |
| 11 | AUSTRÁLIA | 23 | 686 | 5,61% |
| 12 | JAPÃO | 22 | 403 | 5,37% |
| 13 | GRÉCIA | 19 | 97 | 4,63% |
| 14 | PORTUGAL | 19 | 222 | 4,63% |
| 15 | AUSTRIA | 15 | 247 | 3,66% |

Para este estudo sobre eletrolisador, os dados concluíram o número máximo de pesquisas em artigos de autores da Alemanha (165 artigos) tendo participado de mais de 40% dos artigos publicados na área, seguidos da China (91 artigos), Estados Unidos (85 artigos), França (56 artigos) e Espanha (52 artigos). A Alemanha supera os outros países tanto na participação em artigos quanto na quantidade de citações, já os Estados Unidos ficam em segundo lugar quanto a quantidade de citações.

A possível razão para o aumento no número de publicações e citações da Alemanha, China e Estados Unidos pode ser que os países desenvolvidos tenham iniciado a discussão anos antes dos países em desenvolvimento, estabelecendo assim um sistema de gestão relativamente eficaz para futuros avanços (SRIDHAR et al., 2022). Além disso, devido à preocupação ambiental nos EUA e ao alto consumo de combustíveis fósseis, surgiram preocupações com o tema contribuindo para o desenvolvimento e estudos e pesquisas (SILLERO et al., 2022).

O Bibliometrix analisa também a quantidade de publicações considerando somente o autor correspondente e observando se as publicações tiveram contribuição de autores de outros países, e essa informação pode ser analisada pela Tabela 4, onde as maiores publicações de um único país (SCP) e publicações de vários países (MCP) mostraram que os pesquisadores na Alemanha têm trabalhado em colaboração com outros países.

Tabela 4. Quantidade de artigos, considerando o primeiro autor, que tem colaboração com outros países, considerando os 20 primeiros países.

| PAIS | ARTIGO | SCP | MCP |
|----------|--------|-----|-----|
| ALEMANHA | 58 | 43 | 15 |
| CHINA | 35 | 28 | 7 |



| PAIS | ARTIGO | SCP | MCP |
|----------------|--------|-----|-----|
| ESTADOS UNIDOS | 30 | 28 | 2 |
| ESPAÑA | 26 | 22 | 4 |
| ITÁLIA | 25 | 17 | 8 |
| FRANÇA | 22 | 20 | 2 |
| CORÉIA | 16 | 12 | 4 |
| REINO UNIDO | 16 | 13 | 3 |
| PERU | 14 | 9 | 5 |
| AUSTRÁLIA | 13 | 8 | 5 |
| CANADÁ | 13 | 6 | 7 |
| JAPÃO | 9 | 9 | 0 |
| SÉRVIA | 8 | 6 | 2 |
| GRÉCIA | 7 | 6 | 1 |
| AUSTRIA | 6 | 5 | 1 |
| DINAMARCA | 6 | 4 | 2 |
| ÍNDIA | 6 | 6 | 0 |
| PORTUGAL | 6 | 5 | 1 |
| ÁFRICA DO SUL | 6 | 6 | 0 |
| ARGENTINA | 5 | 2 | 3 |

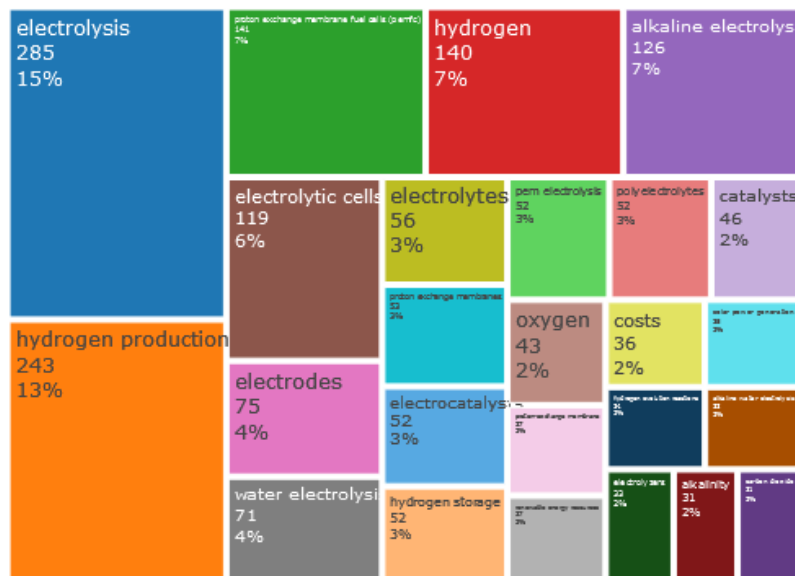
O valor da quantidade de artigos da Alemanha na Tabela 4 difere da quantidade de artigos da Alemanha na Tabela 3, porque na Tabela 4 está considerando apenas a localidade do 1º autor do trabalho. Esses dados mostram, também, que a globalização sobre a eletrólise se estende significativamente pela Ásia, Austrália, América e Europa.

3.6 TreeMap - WordCloud

O TreeMap apresenta, em forma de trama, os termos de palavras-chave mais utilizados em determinado tema e sua frequência de citação. Para esse conjunto de dados, obteve-se a Figura 2 que retrata as palavras-chave do autor que foram consideradas mais significativas no conjunto de documentos analisados.



Figura 2. Quantidade de cada uma das palavras-chave mais citadas



Segundo a Figura 2, a palavra-chave mais frequente foi o termo “*electrolysis*”, com 15% de ocorrência e os termos que menos apareceram foi, por exemplo, “*alkalinity*” que teve 2%.

A importância de cada um dos termos, bem como sua recorrência na literatura e importância para problema, é demonstrada pela magnitude de cada retângulo da Figura 2. Em geral, produção de hidrogênio, hidrogênio, eletrolise, estão entre os tópicos mais discutidos, conforme mostrado na Figura 2, no entanto, é necessário um trabalho adicional sobre “*alkalinity*”, “*alkaline water electrolysis*”, “*hydrogen evolution reactions*”. Os termos que têm baixa ocorrência podem servir de norte para futuras pesquisas, mostrando novos campos a serem explorados e pesquisados.

3.6 Evolução Temática

Já a Figura 3 apresenta graficamente quais foram/são os termos mais utilizados em cada período para abordar determinado tema, nesse caso entre 1978 e 2020 foram os termos “*electrocatalysts*”, “*electrolysis*” e “*hydrogen storage*”, já entre 2022 e 2023 foram “*electrocatalysts*”, “*electrolysis*”, “*hydrogen storage*” e “*polyelectrolytes*”

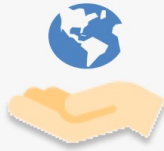
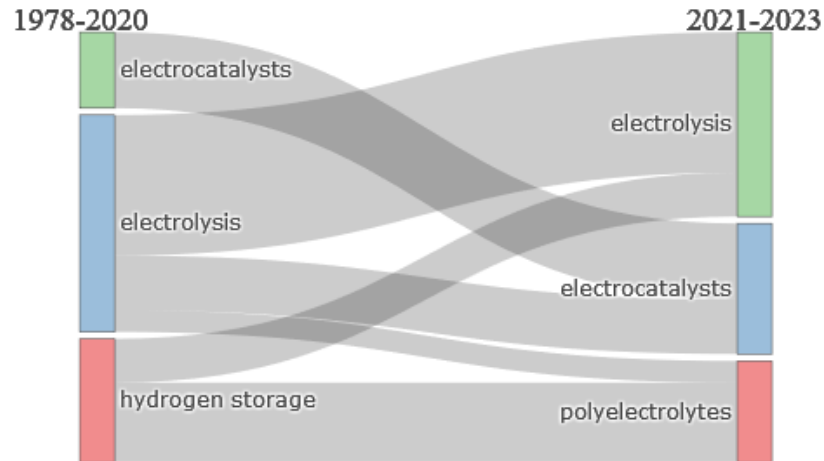


Figura 3. Termos mais abordado em dois diferentes períodos



Fonte: Base Scopus, ferramenta Bibliometrix, Junho 2023

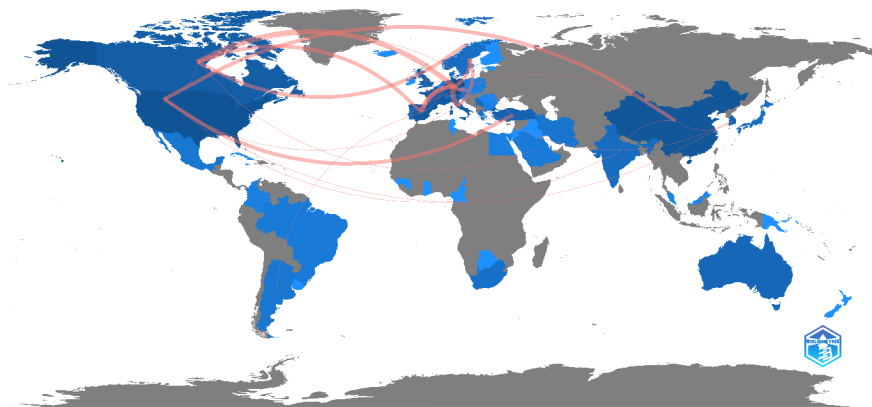
A Figura 3 mostra a tendência de crescimento de publicações e estudo na área de eletrolise e armazenamento de hidrogênio.

3.7 Mapa Mundial de Colaboração

Apresenta graficamente, em formato de mapa-múndi, as redes de colaboração entre os países e suas produções, permitindo identificar os países que mais colaboram para publicação de um determinado tema. Percebe-se que não há colaboração com o Brasil.

Figura 4. Rede de colaboração em forma de mapa

Country Collaboration Map



Fonte: Base Scopus, ferramenta Bibliometrix, Junho 2023



Pela Figura 4 percebe-se poucos países estudando o assunto. Sendo as pesquisas mais concentradas em um número menor de países.

3.8 Contexto Nacional

Filtrando os dados, considerando somente o Brasil, para fazer um estudo nacional, tem-se apenas 4 documentos ligados às instituições brasileiras, sendo eles, o trabalho de (DE FÁTIMA PALHARES; VIEIRA; DAMASCENO, 2018), com título de “*Hydrogen production by a low-cost electrolyzer developed through the combination of alkaline water electrolysis and solar energy use*” publicado na revista “*International Journal of Hydrogen Energy*”, em 2018, já com 60 citações. Os autores desse artigo são da Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Química.

O outro artigo (APARECIDA DA SILVEIRA ROSSI et al., 2021) é intitulado de “*Solar assisted catalytic thermochemical processes: pyrolysis and hydrolysis of Chlamydomonas reinhardtii microalgae*”, foi publicado na revista “*Renewable Energy*”, já teve 8 citações, é de 2021, e os pesquisadores são da Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Química.

Já o outro trabalho (ROSSI et al., 2021), que tem o título de “*Catalytic solar hydrolysis of the Chlamydomonas reinhardtii microalgae*” já teve 1 citação, é também da Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Química, foi publicado na revista “*Biomass and Bioenergy*”.

O trabalho (SANTANA et al., 2023) mais recente nesse conjunto de documentos com autores vinculados a instituição brasileira, é de 2023, com o título “*Economic and Environmental Assessment of Hydrogen Production from Brazilian Energy Grid*” cujos autores são da Universidade de São Paulo.

Percebe-se como ainda precisa se desenvolver muitas pesquisas no Brasil na área, pois dos 410 documentos analisados, somente 4 tem autores vinculados a instituição brasileira, correspondendo a menos de 1%.

4 Considerações finais

O presente trabalho teve como objetivo a análise bibliométrica sobre os temas “*electrolysis alkaline*” e “*electrolysis PEM*” onde buscou-se avaliar as tendências das publicações abordando a produção de hidrogênio, considerando o contexto mundial e nacional.



Para esse objetivo, usou-se a base Scopus e, posteriormente, uma análise dos dados dos documentos encontrados no Bibliometrix, permitindo identificar tendências, padrões e lacunas na produção científica sobre o assunto, além de fornecer informações relevantes investimentos em pesquisa e desenvolvimento nessa área.

Neste estudo foram analisados um total de 410 documentos, sendo 379 artigos e 31 trabalhos de revisão sendo distribuídos em 121 fontes e tendo um total de 1.624 autores.

É conclusivo que, ao longo dos últimos 3 anos, as análises sobre o assunto foram mais difundidas e estimuladas, e isso pode ser pelo fato do interesse pela descarbonização ter aumentado, fazendo países terem que buscar maneiras de reduzir as emissões de CO₂.

Com relação a artigos produzidos com participação de pesquisadores brasileiros tem-se 4 artigos produzidos, onde os autores brasileiros representam menos de 1% dos estudos, estando concentrados na Universidade Federal de Uberlândia.

Percebe-se, que existem poucos trabalhos relacionados com essas palavras considerando o contexto nacional, mostrando que artigos nessa área ainda podem ser explorados.

5 Agradecimentos

Os autores agradecem as agências de fomento, FUNCAP (Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado do Ceará), CAPES e CNPq.

Referências bibliográficas

ABDIN, Z. et al. Hydrogen as an energy vector. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 120, p. 109620, mar. 2020.

AHMADI, P.; DINCER, I.; ROSEN, M. A. Energy and exergy analyses of hydrogen production via solar-boosted ocean thermal energy conversion and PEM electrolysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 38, n. 4, p. 1795–1805, fev. 2013.

APARECIDA DA SILVEIRA ROSSI, R. et al. Solar assisted catalytic thermochemical processes: pyrolysis and hydrolysis of *Chlamydomonas reinhardtii* microalgae. *Renewable Energy*, v. 170, p. 669–682, jun. 2021.

ARIA, M.; CUCCURULLO, C. bibliometrix : An R-tool for comprehensive science mapping analysis. *Journal of Informetrics*, v. 11, n. 4, p. 959–975, nov. 2017.

AUREILLE, R.; POTTIER, J. Projects for industrial development of advanced alkaline electrolyzers in France. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 9, n. 3, p. 183–186, 1984.



BAILLEUX, C. Advanced water alkaline electrolysis: a two-year running of a test plant. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 6, n. 5, p. 461–471, 1981.

BARBIR, F. PEM electrolysis for production of hydrogen from renewable energy sources. *Solar Energy*, v. 78, n. 5, p. 661–669, maio 2005a.

BARBIR, F. PEM electrolysis for production of hydrogen from renewable energy sources. *Solar Energy*, v. 78, n. 5, p. 661–669, maio 2005b.

BORNMANN, L.; DANIEL, H.-D. What do we know about the index? *Journal of the American Society for Information Science and Technology*, v. 58, n. 9, p. 1381–1385, jul. 2007.

CALNAN, S. et al. Development of Various Photovoltaic-Driven Water Electrolysis Technologies for Green Solar Hydrogen Generation. *Solar RRL*, v. 6, n. 5, p. 2100479, 22 maio 2022.

CARMO, M. et al. A comprehensive review on PEM water electrolysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 38, n. 12, p. 4901–4934, abr. 2013.

CORRIGAN, D. A. The Catalysis of the Oxygen Evolution Reaction by Iron Impurities in Thin Film Nickel Oxide Electrodes. *Journal of The Electrochemical Society*, v. 134, n. 2, p. 377–384, 1 fev. 1987a.

CORRIGAN, D. A. The Catalysis of the Oxygen Evolution Reaction by Iron Impurities in Thin Film Nickel Oxide Electrodes. *Journal of The Electrochemical Society*, v. 134, n. 2, p. 377–384, 1 fev. 1987b.

DAVID, M.; OCAMPO-MARTÍNEZ, C.; SÁNCHEZ-PEÑA, R. Advances in alkaline water electrolyzers: A review. *Journal of Energy Storage*, v. 23, p. 392–403, jun. 2019.

DE FÁTIMA PALHARES, D. D.; VIEIRA, L. G. M.; DAMASCENO, J. J. R. Hydrogen production by a low-cost electrolyzer developed through the combination of alkaline water electrolysis and solar energy use. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 43, n. 9, p. 4265–4275, mar. 2018.

DONTHU, N. et al. How to conduct a bibliometric analysis: An overview and guidelines. *Journal of Business Research*, v. 133, p. 285–296, set. 2021.

GAMBETTA, F. Análise técnica e econômica de retificadores de corrente para produção de hidrogênio eletrolítico. Campinas: Universidade Estadual de Campinas, 23 fev. 2010.

GERLOFF, N. Levelized and environmental costs of power-to-gas generation in Germany. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 48, n. 49, p. 18541–18556, jun. 2023.

GHAZINOORY, S.; AMERI, F.; FARNOODI, S. An application of the text mining approach to select technology centers of excellence. *Technological Forecasting and Social Change*, v. 80, n. 5, p. 918–931, jun. 2013.



HALL, D. E. Electrodes for Alkaline Water Electrolysis. *Journal of The Electrochemical Society*, v. 128, n. 4, p. 740–746, 1 abr. 1981.

ITO, H. et al. Properties of Nafion membranes under PEM water electrolysis conditions. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 36, n. 17, p. 10527–10540, ago. 2011.

KAR, S. K.; HARICHANDAN, S.; ROY, B. Bibliometric analysis of the research on hydrogen economy: An analysis of current findings and roadmap ahead. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 47, n. 20, p. 10803–10824, mar. 2022.

LAENGLE, S. et al. Forty years of the European Journal of Operational Research: A bibliometric overview. *European Journal of Operational Research*, v. 262, n. 3, p. 803–816, nov. 2017.

LASKIN, J. Recent development of large electrolytic hydrogen generators. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 3, n. 3, p. 311–320, 1978.

LEROY, R. Industrial water electrolysis: Present and future. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 8, n. 6, p. 401–417, 1983.

LI, Y.; ZHAO, C. Iron-Doped Nickel Phosphate as Synergistic Electrocatalyst for Water Oxidation. *Chemistry of Materials*, v. 28, n. 16, p. 5659–5666, 23 ago. 2016.

MAMACA, N. et al. Electrochemical activity of ruthenium and iridium based catalysts for oxygen evolution reaction. *Applied Catalysis B: Environmental*, v. 111–112, p. 376–380, jan. 2012.

MARINI, S. et al. Advanced alkaline water electrolysis. *Electrochimica Acta*, v. 82, p. 384–391, nov. 2012.

MILLER, H. A. et al. Green hydrogen from anion exchange membrane water electrolysis: a review of recent developments in critical materials and operating conditions. *Sustainable Energy & Fuels*, v. 4, n. 5, p. 2114–2133, 2020.

PALHARES, D. Produção de hidrogênio por eletrólise alcalina da água e energia solar. [s.l.] Universidade Federal de Uberlândia, 29 ago. 2016.

PAVEL, C. C. et al. Highly Efficient Platinum Group Metal Free Based Membrane-Electrode Assembly for Anion Exchange Membrane Water Electrolysis. *Angewandte Chemie International Edition*, v. 53, n. 5, p. 1378–1381, 27 jan. 2014.

RAULS, E. et al. Favorable Start-Up behavior of polymer electrolyte membrane water electrolyzers. *Applied Energy*, v. 330, p. 120350, jan. 2023.

RIEGEL, H.; MITROVIC, J.; STEPHAN, K. Role of mass transfer on hydrogen evolution in aqueous media. *Journal of Applied Electrochemistry*, v. 28, n. 1, p. 10–17, 1997.



ROMMAL, H. E. G.; MORAN, P. J. Time-Dependent Energy Efficiency Losses at Nickel Cathodes in Alkaline Water Electrolysis Systems. *Journal of The Electrochemical Society*, v. 132, n. 2, p. 325–329, 1 fev. 1985.

ROSSI, R. A. DA S. et al. Catalytic solar hydrolysis of the *Chlamydomonas reinhardtii* microalgae. *Biomass and Bioenergy*, v. 152, p. 106183, set. 2021.

SABA, S. M. et al. The investment costs of electrolysis – A comparison of cost studies from the past 30 years. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 43, n. 3, p. 1209–1223, jan. 2018a.

SABA, S. M. et al. The investment costs of electrolysis – A comparison of cost studies from the past 30 years. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 43, n. 3, p. 1209–1223, jan. 2018b.

SANTANA, J. C. C. et al. Economic and Environmental Assessment of Hydrogen Production from Brazilian Energy Grid. *Energies*, v. 16, n. 9, p. 3769, 28 abr. 2023.

SAPOUNTZI, F. M. et al. Electrocatalysts for the generation of hydrogen, oxygen and synthesis gas. *Progress in Energy and Combustion Science*, v. 58, p. 1–35, jan. 2017.

SCHALENBACH, M. et al. Pressurized PEM water electrolysis: Efficiency and gas crossover. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 38, n. 35, p. 14921–14933, nov. 2013a.

SCHALENBACH, M. et al. Pressurized PEM water electrolysis: Efficiency and gas crossover. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 38, n. 35, p. 14921–14933, nov. 2013b.

SILLERO, L. et al. A bibliometric analysis of the hydrogen production from dark fermentation. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 47, n. 64, p. 27397–27420, jul. 2022.

SRIDHAR, A. et al. Progress in the production of hydrogen energy from food waste: A bibliometric analysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 47, n. 62, p. 26326–26354, jul. 2022.

STOJIC, D. LJ. et al. Intermetallics as cathode materials in the electrolytic hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 30, n. 1, p. 21–28, jan. 2005.

URSUA, A.; GANDIA, L. M.; SANCHIS, P. Hydrogen Production From Water Electrolysis: Current Status and Future Trends. *Proceedings of the IEEE*, v. 100, n. 2, p. 410–426, fev. 2012.

VIDAS, L.; CASTRO, R. Recent Developments on Hydrogen Production Technologies: State-of-the-Art Review with a Focus on Green-Electrolysis. *Applied Sciences*, v. 11, n. 23, p. 11363, 1 dez. 2021.

YAN, W.; WANG, D.; BOTTE, G. G. Nickel and cobalt bimetallic hydroxide catalysts for urea electro-oxidation. *Electrochimica Acta*, v. 61, p. 25–30, fev. 2012.



ZENG, K.; ZHANG, D. Recent progress in alkaline water electrolysis for hydrogen production and applications. *Progress in Energy and Combustion Science*, v. 36, n. 3, p. 307–326, jun. 2010.

ZHAO, J. et al. Off-grid solar photovoltaic-alkaline electrolysis-metal hydrogen storage-fuel cell system: An investigation for application in eco-neighborhood in Ningbo, China. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 48, n. 50, p. 19172–19187, jun. 2023.