



UM ESTUDO BIBLIOMÉTRICO SOBRE TENDÊNCIAS DE PESQUISA NA PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO A PARTIR DA FONTE SOLAR BASEADA NA SCOPUS

Carla Freitas de Andrade ¹
Camilla Verbiski de Andrade ²
José Antonio Andrés Velásquez Alegre ³
Daniel Alves Bezerra ⁴

RESUMO

Objetivo: Conduzir um levantamento bibliográfico identificando trabalhos que estão sendo publicados no Brasil e no mundo que relacionam o hidrogênio com a energia fotovoltaica e com energia solar térmica.

Método: O presente trabalho analisou documentos encontrados na base Scopus e utilizou a ferramenta do pacote Bibliometrix R para analisar os documentos encontrados.

Resultados e conclusão: Foram encontrados mais de três mil documentos distribuídos em mais de 1.200 periódicos ao redor do mundo para o caso do hidrogênio com energia fotovoltaica e mais 6.600 documentos relacionados com hidrogênio e energia solar. Observou-se o crescimento do número de publicações relacionadas ao tema ao redor do mundo entre os anos de 1975 e 2022, alcançando um número superior a 200 publicações anuais em anos recentes.

Implicações da pesquisa: No Brasil, o tema ainda precisa ganhar mais espaço, tendo uma quantidade de publicações mais modesta se comparada com outros países. Dessa forma, o presente trabalho mostrou que os temas relacionados ao hidrogênio e à energia solar fotovoltaica estão ganhando espaço, mas que também há bastante potencial ainda a ser explorado.

Originalidade/valor: Este estudo buscou mapear e identificar os principais trabalhos publicados sobre produção de hidrogênio a partir de fontes solar-fotovoltaica e solar-térmica. O estudo foca tanto no cenário mundial quanto no brasileiro e utiliza a base de dados Scopus em associação com a ferramenta Bibliometrix R para analisar os dados reportados.

Palavras-chave: Energia Fotovoltaica, Energia Solar, Hidrogênio Verde, Revisão Bibliométrica.

A BIBLIOMETRIC STUDY ON RESEARCH TRENDS IN HYDROGEN PRODUCTION FROM SOLAR SOURCES BASED ON SCOPUS

ABSTRACT

Purpose: To carry out a bibliographic study reviewing scientific works related to hydrogen and thermal/photovoltaic solar energy being published within Brazil and globally.

¹Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Ceará, Brasil. E-mail: carla@ufc.br

Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-1403-1994>

²Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, Brasil. E-mail: camillaa_andrade@hotmail.com

Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-3271-2881>

³Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, Brasil. E-mail: velasquez@utfpr.edu.br

Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-1305-6567>

⁴Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Ceará, Brasil. E-mail: danielalvesb6@gmail.com

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-9204-8241>



Method/design/approach: The Bibliometrics R tool was applied to analyse document data extracted from the Scopus database.

Results and conclusion: Over three thousand documents about hydrogen with photovoltaic energy were found, published in 1,200 journals. Near 6,600 documents were catalogued for the general issue of hydrogen and solar energy. The number of publications per year continuously grew from 1975 to 2022, reaching 200 in recent years.

Research implications: The theme related to hydrogen and photovoltaic solar energy still needs to gain space in Brazil, as the number of publications is modest compared with other countries. The present work shows that, despite the increasing attention that this theme is receiving, a lot of potential remains unexplored.

Originality/value: This study seeks to map and identify the main published works on hydrogen production from solar-photovoltaic and solar-thermal sources. The study focuses on the global as well as the Brazilian scenario and uses the Scopus database in association with the Bibliometrix R tool to analyse the reported data.

Keywords: Photovoltaic Energy, Solar Energy, Green Hydrogen, Bibliometric Review.

RGSA adota a Licença de Atribuição CC BY do Creative Commons (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



1 INTRODUÇÃO

O presente trabalho trata de uma análise bibliométrica conduzida a partir de publicações que relacionam a energia solar, tanto fotovoltaica como térmica, com a produção de hidrogênio. O método de análise bibliométrica é amplamente utilizado para detectar o estado de um determinado campo de pesquisa, sendo capaz de utilizar análises quantitativas e estatísticas para descrever padrões de publicações em um determinado período.

O mapeamento científico está se tornando uma atividade acadêmica essencial, pois é possível observar as tendências das publicações sobre o assunto abordado, e o *Bibliometrix* é uma ferramenta de código aberto para executar uma análise abrangente de mapeamento da literatura científica. Alguns artigos foram utilizados para embasar a metodologia bibliométrica a ser utilizada, tais como Cuccurullo (2017), Donthu, Kumar, Mukherjee, Pandey e Lim (2021) e Bortoluzzi, De Souza e Furlan (2021).

O hidrogênio é um vetor de energia que apresenta grande potencial na busca pela redução e, a longo prazo, eliminação da emissão de gás carbônico pelas economias, servindo como meio de armazenamento de energia renovável, e principalmente, como combustível em setores difíceis de eletrificar como, transportes pesados, produção de químicos, aço e ferro. Entretanto, para que o hidrogênio tenha um importante papel na descarbonização, sua produção não pode vir de combustíveis fósseis que envolvam a emissão de carbono (Cabral et al., 2014).

O hidrogênio pode permitir que as energias renováveis tenham uma maior contribuição na matriz energética mundial, com o potencial de mitigar os efeitos negativos decorrentes da variabilidade de algumas fontes renováveis, como a energia solar. O hidrogênio também representa uma das opções com maior potencial de barateamento do armazenamento de energia com o desenvolvimento de novas tecnologias, com capacidade de armazenamento por dias, semanas e até meses (Amaral, 2021).

Diante do crescente interesse no tema, este trabalho tem como objetivo buscar, na base *Scopus*, documentos relacionados à produção de hidrogênio verde e energia solar para identificar as publicações nos cenários mundial e brasileiro, mostrando os documentos mais citados, os autores que mais estão publicando na área, as instituições que mais estão desenvolvendo pesquisas relacionadas ao tema, e mostrando também o que ainda pode ser



explorado. Para isso, utilizou-se a ferramenta *Bibliometrix R* para compilar os dados e fazer a análise.

2 MÉTODO DA PESQUISA

O presente trabalho foi baseado numa pesquisa bibliométrica, durante a qual foram inseridas palavras chaves na base *Scopus*, com arquivos contendo todas as informações relacionadas aos documentos encontrados. Depois de inseridas as palavras-chave, e uma vez gerado o arquivos de metadados pela base *Scopus*, no formato .bib, foi utilizada a ferramenta *Bibliometrix R* para a análise em si.

Com os gráficos gerados durante a análise dos dados, foi possível visualizar como estão as pesquisas, publicações, na área de hidrogênio verde relacionado com a energia solar fotovoltaica e identificar os polos que mais estão trabalhando nessa área e saber, também, o que ainda está pouco pesquisado. Foi possível, também, identificar os autores que mais publicam sobre esse assunto, os trabalhos mais citados, os países e centros de maior relevância, dentre outros pontos. As palavras-chave consideradas inicialmente foram “*hydrogen*” and “*photovoltaic*”, onde utilizou-se “*and*” como critério booleano, na relação de todos os descritores, e posteriormente “*hydrogen*” and “*solar energy*”. Com ênfase na caracterização do contexto nacional, também se conduziu uma nova busca na base *Scopus*, onde filtrou-se apenas documentos relacionados ao Brasil, ou seja, em documentos que continham pelo menos um de seus autores vinculados às instituições brasileiras.

Para a realização desse estudo, realizou-se uma busca na base *Scopus*, em novembro de 2022, utilizando a metodologia sugerida por Donthu et al. (2021), juntamente com os parâmetros discriminados na Tabela 1, onde obteve-se 3.503 documentos para a busca considerando “*hydrogen*” and “*photovoltaic*”, e 6.669 para a busca considerando “*hydrogen*” and “*solar energy*”.

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	Quantidade de documentos (total e só para o Brasil)	Filtros inseridos
Scopus	“ <i>hydrogen</i> ” and “ <i>photovoltaic</i> ”	3.503	Documentos: Artigos científicos e Revisão Tipo de Fonte: Journal Língua: Inglesa
		45	Documentos: Artigos científicos e Revisão Tipo de Fonte: Journal Língua: Inglesa País: Brasil
Scopus	“ <i>hydrogen</i> ” and “ <i>solar energy</i> ”	6.669	Documentos: Artigos científicos e Revisão Tipo de Fonte: Journal Língua: Inglesa
		67	Documentos: Artigos científicos e Revisão Tipo de Fonte: Journal Língua: Inglesa País: Brasil

Fonte: Base Scopus (2022)

Após gerar os dois arquivos separadamente com os documentos encontrados, através de uma programação em R, removeu-se os arquivos duplicados, ficando com 9.320 documentos que foram unificados em um só arquivo .bib para ser lido pelo *Biblioshiny*, onde foram gerados gráficos e figuras que puderam ser analisados, e cujas informações gerais, encontra-se na Tabela



2, enquanto a Tabela 3 mostra as informações considerando somente os documentos que estão vinculados a instituições ou pesquisadores brasileiros, que depois de retirar os documentos duplicados, ficou-se com 96 artigos.

A Tabela 2 mostra que o conjunto a ser analisado é formado por 9.320 documentos que estão distribuídos em 1.232 jornais, os quais foram publicados no período entre 1947 e já com alguns de 2023. Já a Tabela 3 mostra que existem 96 documentos ligados a instituições brasileiras ou com pesquisadores brasileiros no conjunto de dados a serem analisados e que estão distribuídos em 60 jornais, num período entre 1985 e 2022, mostrando que o potencial desse tema pode ser explorado de forma mais efetiva.

Tabela 2 – Principais informações sobre os dados gerados pelo Bibliometrix

Descrição	Resultados
INFORMAÇÕES SOBRE OS DADOS	
Intervalo de tempo	1947:2023
Fontes (Revistas, livros, etc.)	1252
Quantidade de documentos	9320
Anos médios de publicação	7,46
Média de citações por documentos	54,64
TIPOS DE DOCUMENTOS	
Artigos científicos	8404
Artigos de revisão	915
Total de autores	19715
Co-autores por documentos	5,12

Fonte: Base Scopus, ferramenta Bibliometrix (2022)

Tabela 3 – Principais informações sobre os dados gerados pelo Bibliometrix vinculados a instituições ou pesquisadores brasileiros

Descrição	Resultados
INFORMAÇÕES SOBRE OS DADOS	
Intervalo de tempo	1985:2022
Fontes (Revistas, livros, etc.)	60
Quantidade de documentos	96
Anos médios de publicação	5,88
Média de citações por documentos	20,7
TIPOS DE DOCUMENTOS	
Artigos científicos	90
Artigos de revisão	6
Total de autores	526
Co-autores por documentos	6,2

Fonte: Base Scopus, ferramenta Bibliometrix (2022)

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O presente trabalho fez uma análise de publicações considerando um contexto mundial e, posteriormente, considerando o contexto nacional do Brasil.

3.1 Produção científica anual

O conjunto de 9.320 documentos analisados foi publicado no período entre 1947 e já considerando os primeiros artigos de 2023, contudo nos anos de 1947, 1955, 1958, 1961, 1963, 1967, 1970 só tem um artigo, e nos anos de 1948 – 1954, 1956 – 1957, 1959 – 1960, 1962, 1964, 1966, 1968 – 1969, 1970 – 1971 não existem artigos publicados. No ano de 1973 aparecem 2 documentos e no ano de 1974, aparecem 5 documentos



A Fig. 1a mostra a quantidade de artigos por ano, desde 1975 até o momento atual ao redor do mundo, enquanto a Fig. 1b mostra a quantidade no Brasil. Percebe-se claramente a tendência de aumento no crescimento de pesquisa e publicação nessa área, mostrando que é um tema atual, ou seja, um motor de desenvolvimento da área, porém o Brasil ainda tem pouquíssimas publicações relacionadas ao assunto.

Com relação ao Brasil, fica claro como são poucos trabalhos abordando a energia fotovoltaica e o hidrogênio, podendo ser considerada uma área de estudo ainda incipiente e que pode ser melhor explorada.

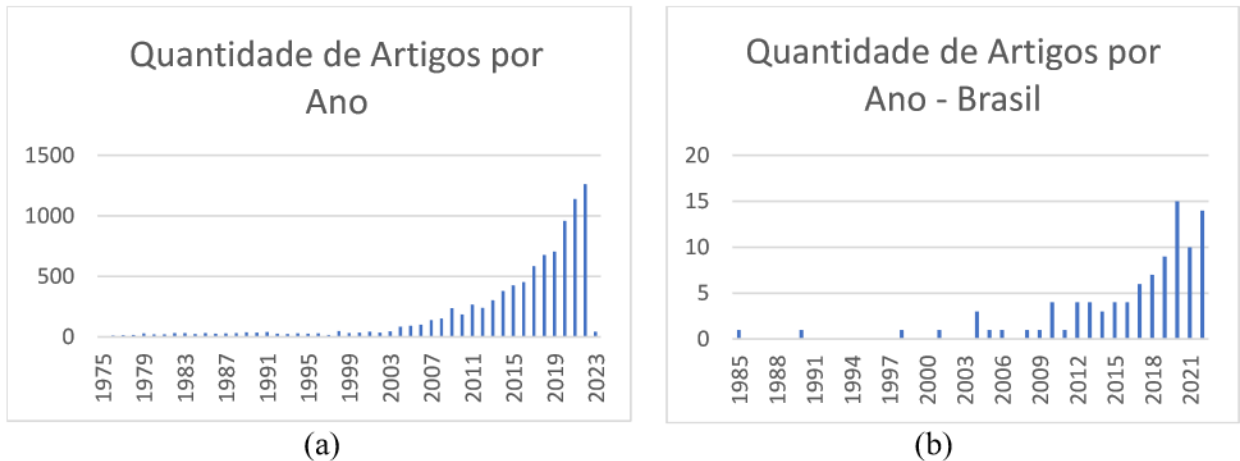


Figura 1. Quantidade de artigos por ano no cenário mundial (a), e no cenário nacional (b)
Fonte: Base Scopus, ferramenta Bibliometrix (2022)

Dentre as publicações mais recentes considerando-se o contexto mundial, pode-se citar o trabalho de Pang et al. (2023) que aborda sobre um sistema que considera energia, refrigeração, aquecimento e energia de hidrogênio como sistemas de utilidade para áreas urbanas e industriais e a energia solar renovável é fornecida ao sistema usando o sistema solar fotovoltaico para geração elétrica e o coletor solar térmico para geração de calor. No trabalho de Zhang et al. (2023) um modelo de utilização de energia renovável, incluindo módulo fotovoltaico, módulo eletrolisador e módulo de célula a combustível, é desenvolvido para simular o desempenho do sistema de produção de hidrogênio e geração de energia. Já no trabalho de Izadi, Shahafve, Ahmadi e Hanafizadeh (2023) um sistema híbrido de energia renovável, usando painéis fotovoltaicos, com armazenamento de energia de hidrogênio é simulado para cobrir a demanda de energia de seções e enfermarias de um hospital que atendeu pacientes com COVID-19. Posteriormente, o sistema modelado foi otimizado com um algoritmo genético de rede neural para calcular a quantidade ideal de energia de demanda da rede, emissão de CO₂, cápsulas de oxigênio e taxa de custo.

No artigo de Chen, Yiliang, Hongxia, Yujie e Xiongwen (2023) sistemas integrados de energia, aquecimento e hidrogênio movido a energia solar baseado em energia fotovoltaica (PV), fototérmica (PT) e fotocatalise para a produção de hidrogênio (PH) é proposto e investigado. No trabalho de Khanmohammadi, Razi, Delpisheh e Panchal (2023) é abordada a modelagem termodinâmica e a otimização multiobjetivo de um sistema multigeração baseado em energia solar que produz água quente, aquecimento, resfriamento, hidrogênio e água doce usando uma unidade de umidificação e desumidificação (HDH).

Considerando-se o contexto nacional, dentre os artigos mais recentes pode-se citar o trabalho de Gabriel et al. (2022), cujo foco é a simulação numérica de um sistema híbrido on-grid para atender pequenas demandas residenciais, utilizando gás natural e energia solar. O sistema inclui um reformador de gás natural, uma célula a combustível, painéis fotovoltaicos (PV) e baterias conectadas à rede. O trabalho de Restrepo, Izidoro, Násner, Venturini e Lora



(2022) analisa a produção de hidrogênio renovável usando energia solar concentrada considerando uma planta de produção hipotética localizada em Guamaré, Brasil. Já no trabalho de Macedo e Peyerl (2022) foi verificada a viabilidade econômica de sistemas híbridos renováveis para produção e armazenamento de hidrogênio no setor elétrico brasileiro, baseando-se em análises de custos econômicos de duas usinas eólicas e solares fotovoltaicas do Brasil. Em Nadaleti, De Souza, e De Souza (2022), os autores buscaram avaliar o potencial energético excedente de usinas solares e nucleares instaladas no Brasil para a produção de hidrogênio verde e roxo utilizando métodos de eletrólise de alta e baixa temperatura.

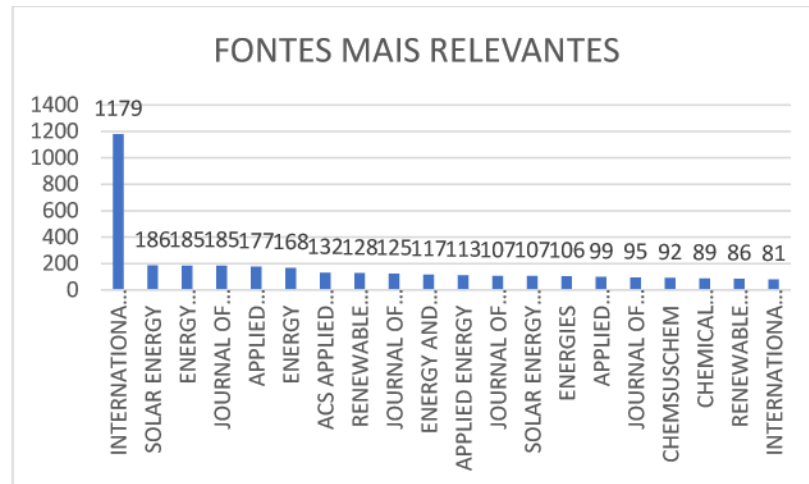


Figura 2. Fontes mais relevantes com seus respectivos números de publicações na área pesquisada
Fonte: Base Scopus, ferramenta Bibliometrix (2022)

3.2 Fontes mais relevantes

A Figura 2 mostra os 20 veículos de publicação mais relevantes quando se considera o conjunto total de documentos analisados, na qual a revista *International Journal of Hydrogen Energy* aparece em primeiro lugar com 1.179 documentos publicados nela, seguido pela *Solar Energy* com 186 artigos publicados.

Para o caso do Brasil, a Figura 3 mostra que o jornal *International Journal of Hydrogen Energy* continua aparecendo em primeiro lugar com 17 publicações na área.

As Figuras 2 e 3 mostram quais revistas estão publicando mais na área de hidrogênio relacionado com energia solar e com fotovoltaica. Isso pode ajudar na escolha de um periódico a ser pesquisado e onde pode-se, eventualmente, publicar. Dentre os artigos encontrados na revista jornal *International Journal of Hydrogen Energy*, os 10 mais citados estão na Tabela 4.

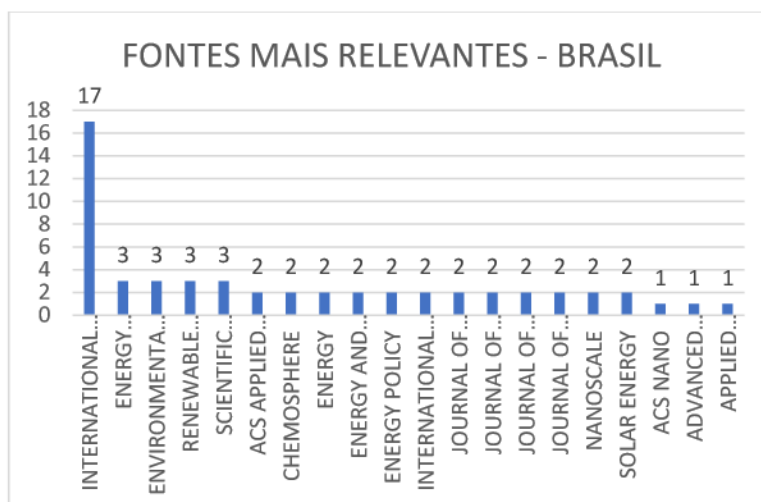


Figura 3. Fontes mais relevantes com seus respectivos números de publicações brasileiras na área
Fonte: Base Scopus, ferramenta Bibliometrix (2022)

Tabela 4 – Relação dos 10 artigos mais citados da revista *International Journal of Hydrogen Energy* considerando o contexto mundial

Artigo	DOI	Total de citações
CARMO M, 2013, INT J HYDROGEN ENERGY (CARMO et al., 2013)	10.1016/j.ijhydene.2013.01.151	2580
BAK T, 2002, INT J HYDROGEN ENERGY (BAK et al., 2002a)	10.1016/S0360-3199(02)00022-8	1342
BALAT M, 2008, INT J HYDROGEN ENERGY (BALAT, 2008)	10.1016/j.ijhydene.2008.05.047	880
MURPHY AB, 2006, INT J HYDROGEN ENERGY (MURPHY et al., 2006)	10.1016/j.ijhydene.2006.01.014	714
LAN R, 2012, INT J HYDROGEN ENERGY (LAN; IRVINE; TAO, 2012)	10.1016/j.ijhydene.2011.10.004	657
STEINFELD A, 2002, INT J HYDROGEN ENERGY (STEINFELD, 2002)	10.1016/S0360-3199(01)00177-X	649
MURADOV NZ, 2008, INT J HYDROGEN ENERGY (MURADOV; VEZIROGLU, 2008)	10.1016/j.ijhydene.2008.08.054	647
SCHIEBAHN S, 2015, INT J HYDROGEN ENERGY (SCHIEBAHN et al., 2015)	10.1016/j.ijhydene.2015.01.123	553
ULLEBERG, 2003, INT J HYDROGEN ENERGY (ULLEBERG, 2003)	10.1016/S0360-3199(02)00033-2	514
ACAR C, 2014, INT J HYDROGEN ENERGY-a (ACAR; DINCER, 2014)	10.1016/j.ijhydene.2013.10.060	473

Fonte: Base Scopus, ferramenta Bibliometrix (2022)

Considerando o contexto nacional, dentre os artigos encontrados na revista *International Journal of Hydrogen Energy*, pode-se citar o trabalho de Palhares, Vieira e Damasceno (2018) que projetou uma célula eletrolítica cilíndrica e o sistema foi conectado a um painel fotovoltaico de 20W para produzir hidrogênio. O trabalho de Micena, Llerena-Pizarro, De Souza e Silveira (2020) propõe um projeto de Estação de Reabastecimento de Hidrogênio (HRS) alimentada por uma usina fotovoltaica para abastecer a frota de táxis de uma cidade brasileira considerando diferentes cenários e assumindo que veículos movidos a hidrogênio. Já o trabalho de Esteves et al. (2015) analisa a viabilidade da produção de amônia, por meio do processo Haber-Bosch com hidrogênio por fonte solar fotovoltaico.



3.3 Afiliações mais importantes

As instituições mundiais que mais estão trabalhando, produzindo publicações com o tema em questão, aparecem na Figura 4, com destaque para a Universidade da Califórnia.

No caso específico do Brasil, a Universidade de São Paulo lidera com 18 artigos, seguida da Universidade Federal de Santa Catarina com 5 artigos, conforme mostra a Tabela 5.

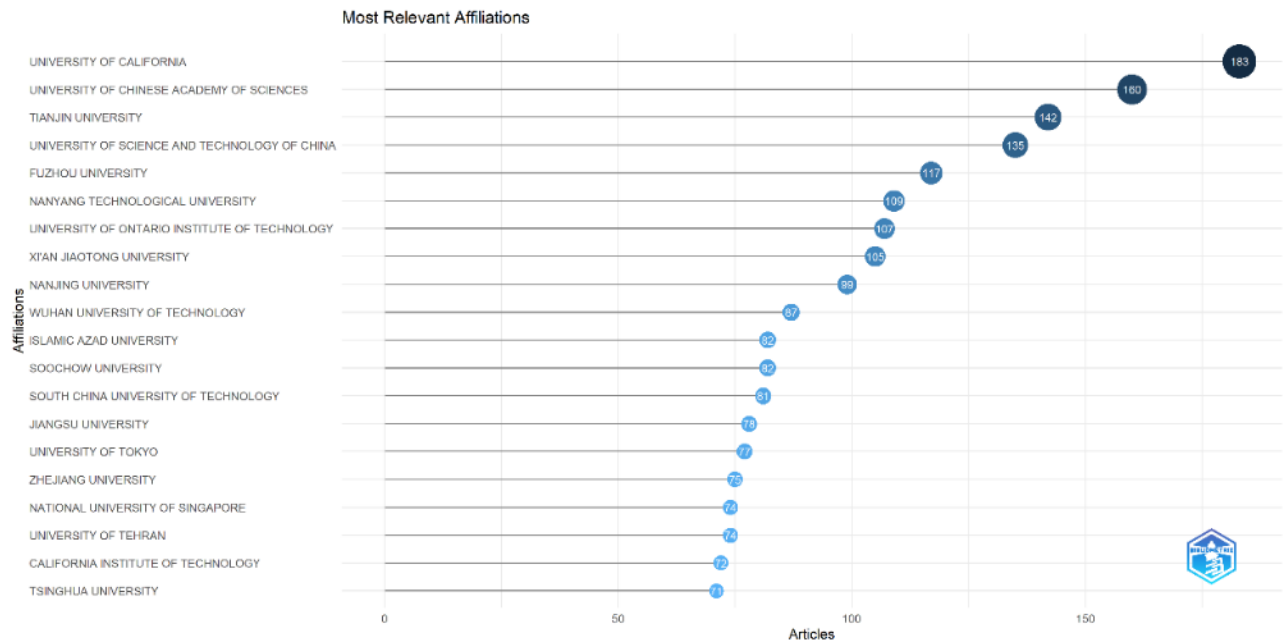


Figura 4. Instituições mais relevantes e as respectivas quantidades de artigos produzidos

Fonte: Base Scopus, ferramenta Bibliometrix (2022)

Tabela 5 – Relação dos 10 artigos mais citados da revista *International Journal of Hydrogen Energy* considerando o contexto mundial

Instituições	Artigos
UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO	18
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA	5
UNIVERSIDADE FEDERAL DE JEQUITINHONHA E MUCURI (UFVJM)	5
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO DEL-REI	3
UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA	3
UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SÃO PAULO (UNESP)	3
UNIVERSIDADE DO ESTADO DO CEARÁ	3
UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS	3
UNIVERSIDADE FEDERAL DO ABC	3
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL	3

Fonte: Base Scopus, ferramenta Bibliometrix (2022)

3.4 Países dos autores correspondentes

A Figura 5 mostra a quantidade de trabalhos relacionados ao país dos autores correspondentes. A China lidera com 2.613 artigos, seguida dos Estados Unidos com 973 e do Japão com 424.

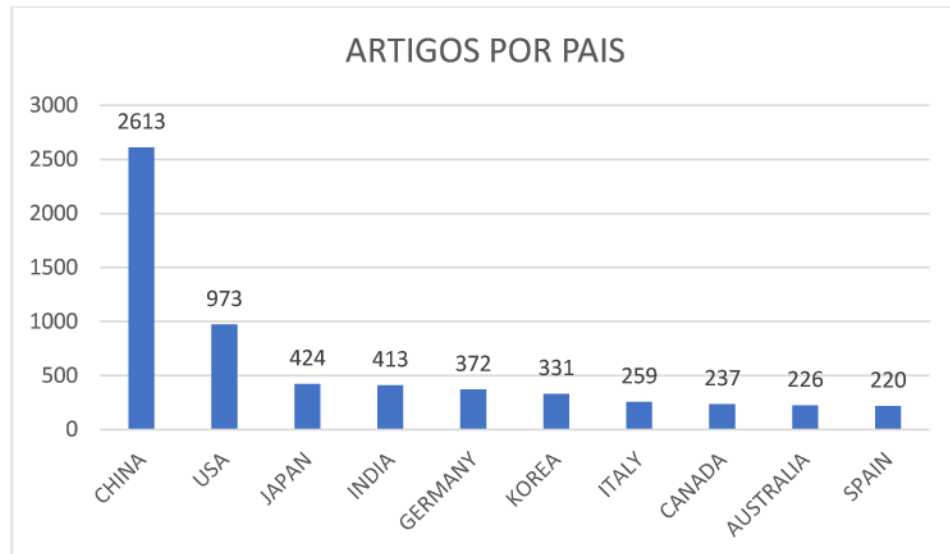


Figura 5. Quantidade de artigos por país

Fonte: Base Scopus, ferramenta Bibliometrix (2022)

3.5 Artigos mais citados no Brasil e no mundo

A Tabela 6 mostra 20 artigos, dentre os mais citados, e o respectivo número total de citações de cada um, considerando o contexto mundial da pesquisa realizada.

O trabalho de Wang et al. (2009) mostra um material abundante, nitreto de carbono polimérico, que possui potencial para produzir hidrogênio a partir de água sob irradiação de luz. No trabalho de Lewis e Nocera (2006) são abordados os desafios científicos envolvidos para capturar e converter energia solar e depois armazenar a energia como hidrogênio. Já Carrasco et al. (2006) apresentaram novas tendências em eletrônica de potência para a integração de geradores de energia eólica e fotovoltaica (PV) e uma revisão da tecnologia de sistema de armazenamento apropriada usada para a integração de fontes intermitentes. Conforme Zou, Ye, Sayama e Arakawa (2001), a divisão fotocatalítica da água em hidrogênio e oxigênio usando energia solar é uma fonte potencialmente limpa e renovável de combustível de hidrogênio e esforços têm sido investidos no desenvolvimento de fotocatalisadores capazes de utilizar a luz visível menos energética. Segundo Carmo, Fritz, Mergel e Stolten (2013), o hidrogênio é considerado o melhor meio para armazenar energia proveniente de fontes de energia renováveis e intermitentes e a eletrólise PEM fornece uma solução para a produção de hidrogênio e é adequada para combinar com fonte solar. E Grätzel (2009) afirma que capturar a energia solar e convertê-la em eletricidade ou combustíveis químicos, como o hidrogênio, a baixo custo e usando matérias-primas abundantemente disponíveis, continua sendo um grande desafio, sendo assim sua pesquisa visa identificar e fornecer soluções para alguns problemas de eficiência.

O trabalho de Cook et al. (2010) aborda a fotocatalise baseada em semicondutores que atrai grande atenção devido à sua capacidade de utilizar diretamente a energia solar para a produção de combustíveis solares, como hidrogênio. Já Low, Yu, Jaroniec, Wageh e Al-Ghamdi (2017) falam sobre os desafios relacionados com as células fotoeletroquímicas (PEC) que oferecem a capacidade de converter energia eletromagnética de nossa maior fonte renovável, o sol, em energia química armazenada através da divisão da água em oxigênio molecular e hidrogênio. Maeda e Domen (2010) descreveram o estado da arte e os desafios sobre fotocatalisadores, pois a divisão da água para formar hidrogênio e oxigênio usando energia solar na presença de fotocatalisadores semicondutores tem sido estudada há muito tempo como um meio potencial de produção de combustível limpo e em larga escala. No artigo



de Bak, Nowotny, Rekas e Sorrell (2002) os autores consideraram a geração de hidrogênio a partir da água utilizando energia solar, onde o trabalho foi focado nas questões relacionadas aos materiais no desenvolvimento de células fotoeletroquímicas (PECs) de alta eficiência.

Tabela 6 – Os artigos mais citados mundialmente relacionados à pesquisa considerada

Artigo	DOI	Total de citações
WANG X, 2009, NAT MATER (WANG et al., 2009)	10.1038/nmat2317	8897
LEWIS NS, 2006, PROC NATL ACAD SCI U S A (LEWIS; NOCERA, 2006)	10.1073/pnas.0603395103	6325
CARRASCO JM, 2006, IEEE TRANS IND ELECTRON (CARRASCO et al., 2006)	10.1109/TIE.2006.878356	3253
ZOU Z, 2001, NATURE (ZOU et al., 2001)	10.1038/414625a	2961
CARMO M, 2013, INT J HYDROGEN ENERGY (CARMO et al., 2013)	10.1016/j.ijhydene.2013.01.151	2580
GRÄTZEL M, 2009, ACC CHEM RES (GRÄTZEL, 2009)	10.1021/ar900141y	2373
COOK TR, 2010, CHEM VER (COOK et al., 2010)	10.1021/cr100246c	2353
LOW J, 2017, ADV MATER (LOW et al., 2017)	10.1002/adma.201601694	2161
SIVULA K, 2011, CHEMSUSCHEM (SIVULA; LE FORMAL; GRÄTZEL, 2011)	10.1002/cssc.201000416	2131
KAMAT PV, 2007, J PHYS CHEM C (KAMAT, 2007)	10.1021/jp066952u	2053
PANWAR NL, 2011, RENEWABLE SUSTAINABLE ENERGY VER (PANWAR; KAUSHIK; KOTHARI, 2011)	10.1016/j.rser.2010.11.037	2045
MAEDA K, 2010, J PHYS CHEM LETT (MAEDA; DOMEN, 2010)	10.1021/jz1007966	2021
YANG J, 2013, ACC CHEM RES (YANG et al., 2013)	10.1021/ar300227e	1973
LUO J, 2014, SCIENCE (LUO et al., 2014)	10.1126/science.1258307	1931
GUST D, 2009, ACC CHEM RES (GUST; MOORE; MOORE, 2009)	10.1021/ar900209b	1652
FRIEBEL D, 2015, J AM CHEM SOC (FRIEBEL et al., 2015)	10.1021/ja511559d	1578
BAK T, 2002, INT J HYDROGEN ENERGY (BAK et al., 2002b)	10.1016/S0360-3199(02)00022-8	1342
JACOBSON MZ, 2009, ENERGY ENVIRON SCI (JACOBSON, 2009)	10.1039/b809990c	1195
HANNA MC, 2006, J APPL PHYS (HANNA; NOZIK, 2006)	10.1063/1.2356795	1167
CHUEH WC, 2010, SCIENCE (CHUEH et al., 2010)	10.1126/science.1197834	1144

Fonte: Base Scopus, ferramenta Bibliometrix (2022)

Na Tabela 7, listou-se 10 artigos dentre aqueles com maior quantidade de citações, vinculados a instituições ou autores brasileiros.

Dentre os trabalhos com mais citações que tem autores vinculados a instituições brasileiras, pode-se citar o trabalho de Khosravi, Koury, Machado e Pabon (2018) cujo objetivo foi definir e avaliar um sistema de energia renovável híbrida off-grid com armazenamento de hidrogênio, combinando energia solar e eólica, unidade de produção de hidrogênio e célula de combustível. Já Silva, De Oliveira e Severino (2010) avaliaram a utilização de um sistema fotovoltaico-célula-combustível para o fornecimento de energia elétrica em uma comunidade isolada na região amazônica, analisando o sistema de armazenamento de hidrogênio. E no trabalho de Da Silva et al. (2005), a viabilidade técnica e econômica para implantação de uma hipotética planta de produção de hidrogênio, alimentada por energia elétrica gerada por fontes eólica e solar e hidroeletricidade convencional, foi estudada através dos potenciais de para o nordeste do Brasil, a partir de onde o hidrogênio produzido seria exportado.



Tabela 7 – Os artigos mais citados mundialmente relacionados à pesquisa considerada

Artigo	DOI	Total de citações
KHOSRAVI A, 2018, ENERGY (KHOSRAVI et al., 2018)	10.1016/j.energy.2018.02.008	102
SILVA SB, 2013, RENEW ENERGY(SILVA; SEVERINO; DE OLIVEIRA, 2013)	10.1016/j.renene.2013.02.004	92
GONÇALVES JM, 2020, J MATER CHEM A (GONÇALVES et al., 2020)	10.1039/c9ta10857b	68
MENDES PRC, 2016, J POWER SOURCES (MENDES et al., 2016)	10.1016/j.jpowsour.2016.07.076	56
DA SILVA EP, 2005, SOL ENERGY (DA SILVA et al., 2005)	10.1016/j.solener.2004.10.011	54
WENDER H, 2013, NANOSCALE (WENDER et al., 2013)	10.1039/c3nr02195e	52
DOS SANTOS WS, 2016, SCI REP(DOS SANTOS et al., 2016)	10.1038/srep31406	51
KHOSRAVI A, 2019, ENERGY(KHOSRAVI et al., 2019)	10.1016/j.energy.2019.01.100	50
SILVA SB, 2010, ENERGY POLICY(SILVA; DE OLIVEIRA; SEVERINO, 2010)	10.1016/j.enpol.2010.06.041	49
DE FÁTIMA PALHARES DD, 2018, INT J HYDROGEN ENERGY (DE FÁTIMA PALHARES; VIEIRA; DAMASCENO, 2018b)	10.1016/j.ijhydene.2018.01.051	48

Fonte: Base Scopus, ferramenta Bibliometrix (2022)

3.6 Palavras-chave mais relevantes

Para visualizar melhor as palavras-chave encontradas no conjunto de documentos, utilizou-se o *TreeMap*. Com ele, é possível perceber quais temas têm sido mais explorados e os que ainda precisam ser mais estudados. A Figura 6 mostra *TreeMap* para o conjunto de palavras pesquisadas considerando o contexto mundial. Quanto maior o quadro ocupado por cada palavra maior o número de resultados encontrados e sua relevância.

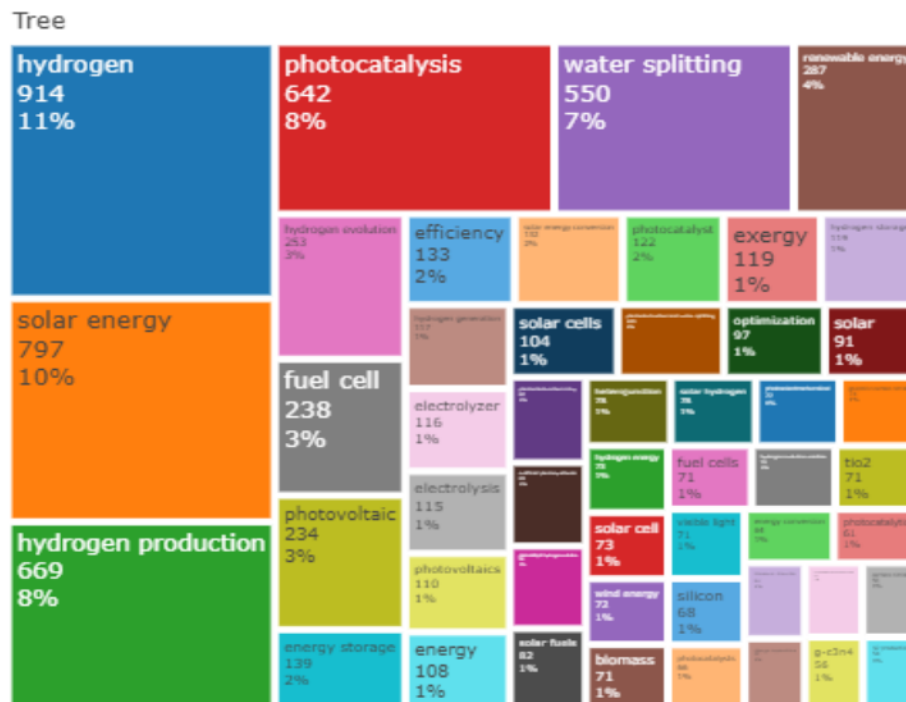


Figura 6. TreeMap destacando as palavras-chave dos autores

Fonte: Base Scopus, ferramenta Bibliometrix (2022)



- A instituição que mais tem trabalhos publicados é a Universidade da Califórnia com 183 documentos, e o centro de pesquisa que mais Percebe-se como o tema ainda é novo e pode ser explorado em diversas frentes, como na questão de gerenciamento e armazenamento. Esse trabalho pode servir como um guia para mostrar onde se está estudando o assunto, o que está sendo pesquisado nessa área e o que pode ainda ser explorado.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste estudo, foram analisados, considerando o contexto mundial, 9.320 documentos distribuídos em 1.252 Revistas científicas e 96 documentos ligados a instituições ou com pesquisadores brasileiros distribuídos em 60 Revistas, obtidos no banco de dados da Scopus que foram analisadas e avaliadas usando o *Bibliometrix* como ferramenta de análise.

As pesquisas relacionadas às fontes de energia renováveis, mais especificamente o hidrogênio e energia solar e fotovoltaica, vêm crescendo nos últimos anos e os resultados encontrados na análise mostram que esse crescimento se manteve estável nas últimas décadas, com espaço para crescimento futuro. Quanto ao contexto nacional, percebeu-se uma forte carência de trabalhos da área no Brasil, ressaltando que é um assunto novo no país e que ainda pode ser bastante explorado.

Este trabalho ofereceu uma breve análise da difusão dos estudos na área de hidrogênio gerado por fonte solar no Brasil e no mundo, o que pode contribuir para as pesquisas científicas futuras e em andamento nesse tema, dando um direcionamento a pesquisadores das principais fontes de publicações sobre o tema. Além do mais, pesquisadores poderão se beneficiar dessa análise para explorar temas ainda pouco trabalhados.

A análise bibliométrica resultou nas seguintes observações:

- Os jornais que tiveram mais publicações na área, considerando o contexto mundial, foram *International Journal of Hydrogen Energy* e *Solar Energy*. Já considerando o contexto nacional, foi a revista *International Journal of Hydrogen Energy*.
- Existe uma tendência de crescimento de pesquisas relacionadas ao tema escolhido nos últimos anos, e mais autores brasileiros passaram a publicar artigos sobre o assunto.
- A identificação dos países que mais tem publicações relacionadas ao assunto pesquisado.
- Uma breve relação de trabalhos com grande quantidade de citações considerando tanto o cenário mundial quanto nacional.
- Uma análise através do *TreeMap* permitiu analisar as palavras chaves mais utilizadas pelos autores e os temas que ainda podem ser melhor explorados com relação ao hidrogênio e a fonte solar no Brasil e no mundo.

produz atualmente publicações sobre o tema no Brasil é a Universidade de São Paulo, com 18 documentos, o que mostra que a quantidade de publicações no Brasil ainda é baixa se comparada com outros países.

Essa análise abre espaço para mostrar que ainda existe muito campo para estudos nessa área.

REFERÊNCIAS

- Acar, C., & Dincer, I. (2014). Comparative assessment of hydrogen production methods from renewable and non-renewable sources. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39(1), 1–12.
- Amaral, M. (2021). Avaliação técnica do transporte e do armazenamento de hidrogênio visando a descarbonização do sistema energético nacional. 107. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energias Renováveis). Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, Portugal.



Aria, M. & Cuccurullo, C. (2017). Bibliometrix : An R-tool for comprehensive science mapping analysis. *Journal of Informetrics*, 11(4), 959–975.

Bak, T., Nowotny, J., Rekas, M., & Sorrell, C. C. (2002). Photo-electrochemical hydrogen generation from water using solar energy. Materials-related aspects. *International Journal of Hydrogen Energy*, 27(10), 991–1022.

Balat, M. (2008). Potential importance of hydrogen as a future solution to environmental and transportation problems. *International Journal of Hydrogen Energy*, 33(15), 4013–4029.

Bortoluzzi, M., De Souza, C. C., & Furlan, M. (2021). Bibliometric analysis of renewable energy types using key performance indicators and multicriteria decision models. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 143, 110958.

Cabral, A. C., Frigo, E. P., Perissato, S. M., De Azevedo, K., Frigo, J. P., & Bonassa, G. (2014). Hidrogênio Uma Fonte De Energia Para O Futuro. *Revista Brasileira de Energias Renováveis*, 3(2), 128–135.

Carmo, M., Fritz, D. L., Mergel, J., & Stolten, D. (2013). A comprehensive review on PEM water electrolysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, 38(12), 4901–4934.

Carrasco, J. M., Franquelo, L. G., Bialasiewicz, J. T., Galvan, E., PortilloGuisado, R. C., Prats, M. A. M., Leon, J. I., & Moreno-Alfonso, N. (2006). Power-Electronic Systems for the Grid Integration of Renewable Energy Sources: A Survey. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 53(4), 1002–1016.

Chen, Z., Yiliang, X., Hongxia, Z., Yujie, G., & Xiongwen, Z. (2023). Optimal design and performance assessment for a solar powered electricity, heating and hydrogen integrated energy system. *Energy*, 262, 125453.

Chueh, W. C., Falter, C., Abbott, M., Scipio, D., Furler, P., Haile, S. M., & Steinfeld, A. (2010). High-Flux Solar-Driven Thermochemical Dissociation of CO₂ and H₂O Using Nonstoichiometric Ceria. *Science*, 330(6012), 1797–1801.

Cook, T. R., Dogutan, D. K., Reece, S. Y., Surendranath, Y., Teets, T. S., & Nocera, D. G. (2010). Solar Energy Supply and Storage for the Legacy and Nonlegacy Worlds. *Chemical Reviews*, 110(11), 6474–6502.

Da Silva, E. P., Neto, A. J. M., Ferreira, P. F. P., Camargo, J. C., Apolinário, F. R., & Pinto, C. S. (2005). Analysis of hydrogen production from combined photovoltaics, wind energy and secondary hydroelectricity supply in Brazil. *Solar Energy*, 78(5), 670–677.

Gabriel, R. de O., Junior, E. de S. L., Braga, S. L., Pradelle, F., Serra, E. T., & Vieira, C. L. C. S. (2022). Technical, economic and environmental analysis of a hybrid CHP system with a 5 kW PEMFC, photovoltaic panels and batteries in the Brazilian scenario. *Energy Conversion and Management*, 269, 116042.

Donthu, N., Kumar, S., Mukherjee, D., Pandey, N., & Lim, W. M. (2021). How to conduct a bibliometric analysis: An overview and guidelines. *Journal of Business Research*, 133, 285–296.



- Dos Santos, W. S., Rodriguez, M., Afonso, A. S., Mesquita, J. P., Nascimento, L. L., Patrocínio, A. O. T., Silva, A. C., Oliveira, L. C. A., Fabris, J. D., & Pereira, M. C. (2016). A hole inversion layer at the BiVO₄/Bi₄V₂O₁₁ interface produces a high tunable photovoltage for water splitting. *Scientific Reports*, 6(1), 31406.
- Esteves, N. B., Sigal, A., Leiva, E. P. M., Rodríguez, C. R., Cavalcante, F. S. A., & de Lima, L. C. (2015). Wind and solar hydrogen for the potential production of ammonia in the state of Ceará – Brazil. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40(32), 9917–9923.
- Friebel, D., Louie, M. W., Bajdich, M., Sanwald, K. E., Cai, Y., Wise, A. M., Cheng, M.-J., Sokaras, D., Weng, T.-C., Alonso-Mori, R., Davis, R. C., Bargar, J. R., Nørskov, J. K., Nilsson, A., & Bell, A. T. (2015). Identification of Highly Active Fe Sites in (Ni,Fe)OOH for Electrocatalytic Water Splitting. *Journal of the American Chemical Society*, 137(3), 1305–1313.
- Gonçalves, J. M., Ireno da Silva, M., Angnes, L., & Araki, K. (2020). Vanadium-containing electro and photocatalysts for the oxygen evolution reaction: a review. *Journal of Materials Chemistry A*, 8(5), 2171–2206.
- Grätzel, M. (2009). Recent Advances in Sensitized Mesoscopic Solar Cells. *Accounts of Chemical Research*, 42(11), 1788–1798.
- Gust, D., Moore, T. A., & Moore, A. L. (2009). Solar Fuels via Artificial Photosynthesis. *Accounts of Chemical Research*, 42(12), 1890–1898.
- Hanna, M. C., & Nozik, A. J. (2006). Solar conversion efficiency of photovoltaic and photoelectrolysis cells with carrier multiplication absorbers. *Journal of Applied Physics*, 100(7), 074510.
- Izadi, A., Shahafve, M., Ahmadi, P., & Hanafizadeh, P. (2023). Design, and optimization of COVID-19 hospital wards to produce Oxygen and electricity through solar PV panels with hydrogen storage systems by neural network-genetic algorithm. *Energy*, 263, 125578.
- Jacobson, M. Z. (2009). Review of solutions to global warming, air pollution, and energy security. *Energy Environ. Sci.*, 2(2), 148–173.
- Kamat, P. V. (2007). Meeting the Clean Energy Demand: Nanostructure Architectures for Solar Energy Conversion. *The Journal of Physical Chemistry C*, 111(7)2834–2860.
- Khanmohammadi, S., Razi, S., Delpisheh, M., & Panchal, H. (2023). Thermodynamic modeling and multi-objective optimization of a solar-driven multi-generation system producing power and water. *Desalination*, 545, 116158.
- Khosravi, A., Koury, R. N. N., Machado, L., & Pabon, J. J. G. (2018). Energy, exergy and economic analysis of a hybrid renewable energy with hydrogen storage system. *Energy*, 148, 1087–1102.
- Khosravi, A., Syri, S., Assad, M. E. H., & Malekan, M. (2019). Thermodynamic and economic analysis of a hybrid ocean thermal energy conversion/photovoltaic system with hydrogen-based energy storage system. *Energy*, 172, 304–319.



- Lan, R., Irvine, J. T. S., & Tao, S. (2012). Ammonia and related chemicals as potential indirect hydrogen storage materials. *International Journal of Hydrogen Energy*, 37(2), 1482–1494.
- Lewis, N., S. & Nocera, D. G. (2006). Powering the planet: Chemical challenges in solar energy utilization. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 103(43), 15729–15735.
- Low, J., Yu, J., Jaroniec, M., Wageh, S., & Al-Ghamdi, A. A. (2017). Heterojunction Photocatalysts. *Advanced Materials*, 29(20), 1601694.
- Luo, J., Im, J.-H., Mayer, M. T., Schreier, M., Nazeeruddin, M. K., Park, N.-G., Tilley, S. D., Fan, H. J., & Grätzel, M. (2014). Water photolysis at 12.3% efficiency via perovskite photovoltaics and Earth-abundant catalysts. *Science*, 345(6204), 1593–1596.
- Macedo, S. F., & Peyerl, D. (2022). 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*, 47(19), 10460–10473.
- Maeda, K., & Domen, K. (2010). Photocatalytic Water Splitting: Recent Progress and Future Challenges. *The Journal of Physical Chemistry Letters*, 1(18), 2655–2661.
- Mendes, P. R. C., Isorna, L. V., Bordons, C., & Normey-Rico, J. E. (2016). Energy management of an experimental microgrid coupled to a V2G system. *Journal of Power Sources*, 327, 702–713.
- Micena, R. P., Llerena-Pizarro, O. R., De Souza, T. M., & Silveira, J. L. (2020). Solar-powered Hydrogen Refueling Stations: A techno-economic analysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(3), 2308–2318.
- Muradov, N., & Veziroglu, T. (2008). “Green” path from fossil-based to hydrogen economy: An overview of carbon-neutral technologies. *International Journal of Hydrogen Energy*, 33(23), 6804–6839.
- Murphy, A., Barnes, P., Randeniya, L., Plumb, I., Grey, I., Horne, M., & Glasscock, J. (2006). Efficiency of solar water splitting using semiconductor electrodes. *International Journal of Hydrogen Energy*, 31(14), 1999–2017.
- Nadaleti, W. C., De Souza, E. G., & De Souza, S. N. M. (2022). The potential of hydrogen production from high and low-temperature electrolysis methods using solar and nuclear energy sources: the transition to a hydrogen economy in Brazil. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(82), 34727–34738.
- Palhares, D. D. de F., Vieira, L. G. M. & Damasceno, J. J. R. (2018). Hydrogen production by a low-cost electrolyzer developed through the combination of alkaline water electrolysis and solar energy use. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(9), 4265–4275.
- Pang, K. Y., Liew, P. Y., Woon, K. S., Ho, W. S., Wan Alwi, S. R., & Klemeš, J. J. (2023). Multi-period multi-objective optimisation model for multi-energy urban-industrial symbiosis with heat, cooling, power and hydrogen demands. *Energy*, 262, 125201.



- Panwar, N. L., Kaushik, S. C., & Kothari, S. (2011). Role of renewable energy sources in environmental protection: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(3), 1513–1524.
- Restrepo, J. C., Izidoro, D. L., Násner, A. M. L., Venturini, O. J., & Lora, E. E. S (2022). Techno-economical evaluation of renewable hydrogen production through concentrated solar energy. *Energy Conversion and Management*, 258, 115372.
- Schiebahn, S., Grube, T., Robinius, M., Tietze, V., Kumar, B., & Stolten, D. (2015). Power to gas: Technological overview, systems analysis and economic assessment for a case study in Germany. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40(12), 4285–4294.
- Silva, S. B., De Oliveira, M. A. G., & Severino, M. M. (2010). Economic evaluation and optimization of a photovoltaic–fuel cell–batteries hybrid system for use in the Brazilian Amazon. *Energy Policy*, 38(11), 6713–6723.
- Silva, S. B., Severino, M. M., & De Oliveira, M. A. G. (2013). A stand-alone hybrid photovoltaic, fuel cell and battery system: A case study of Tocantins, Brazil. *Renewable Energy*, 57, 384–389.
- Sivula, K., Le Formal, F., & Grätzel, M. (2011). Solar Water Splitting: Progress Using Hematite (α -Fe₂O₃) Photoelectrodes. *ChemSusChem*, 4(4), 432–449.
- Steinfeld, A. (2002). Solar hydrogen production via a two-step water-splitting thermochemical cycle based on Zn/ZnO redox reactions. *International Journal of Hydrogen Energy*, 27(6), 611–619.
- Ulleberg, O. (2003). Modeling of advanced alkaline electrolyzers: a system simulation approach. *International Journal of Hydrogen Energy*, 28(1), 21–33.
- Wang, X., Maeda, K., Thomas, A., Takanabe, K., Xin, G., Carlsson, J. M., Domen, K., & Antonietti, M. (2008). A metal-free polymeric photocatalyst for hydrogen production from water under visible light. *Nature Materials*, 8(1), 76–80.
- Wender, H., Gonçalves, R. V., Dias, C. S. B., Zapata, M. J. M., Zagonel, L. F., Mendonça, E. C., Teixeira, S. R., & Garcia, F. (2013). Photocatalytic hydrogen production of Co(OH)₂ nanoparticle-coated α -Fe₂O₃ nanorings. *Nanoscale*, 5(19), 9310.
- Yang, J., Wang, D., Han, H., & Li, C. (2013). Roles of Cocatalysts in Photocatalysis and Photoelectrocatalysis. *Accounts of Chemical Research*, 46(8), 1900–1909.
- Zhang, F., Wang, B., Gong, Z., Zhang, X., Qin, Z., & Jiao, K. (2023). Development of photovoltaic-electrolyzer-fuel cell system for hydrogen production and power generation. *Energy*, 263, 125566.
- Zou, Z., Ye, J., Sayama, K., & Arakawa, H. (2001). Direct splitting of water under visible light irradiation with an oxide semiconductor photocatalyst. *Nature*, 414(6864), 625–627.