



**UNIVERSIDADE DA INTEGRAÇÃO INTERNACIONAL DA LUSOFONIA AFRO -
BRASILEIRA**
INSTITUTO DE ENGENHARIAS E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL
BACHARELADO EM ENGENHARIA DE ENERGIAS

BATISTA DALA CATUMBA

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

REDENÇÃO - CE

2023

BATISTA DALA CATUMBA

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

Monografia apresentada ao Instituto de Engenharias e Desenvolvimento Sustentável (IEDS) da Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (UNILAB), como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Energias.

Orientador: Prof. Dr. José Cleiton Sousa dos Santos.

REDENÇÃO - CE

2023

Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira
Sistema de Bibliotecas da UNILAB
Catalogação de Publicação na Fonte.

Catumba, Batista Dala.

C369s

Sustentabilidade e desafios na produção de hidrogênio: uma análise bibliométrica avançada / Batista Dala Catumba. - Redenção, 2023.

49f: il.

Monografia - Curso de Engenharia de Energias, Instituto de Engenharias e Desenvolvimento Sustentável, Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira, Redenção, 2023.

Orientador: Prof.º Dr. José Cleiton Sousa dos Santos.

1. Análise bibliométrica. 2. Revisão bibliográfica. 3. Matérias-primas. 4. Hidrogênio - Produção. I. Título

CE/UF/BSCA

CDD 661.08

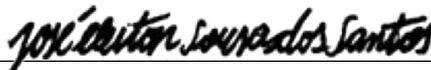
BATISTA DALA CATUMBA

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

Monografia apresentada ao Instituto de Engenharias e Desenvolvimento Sustentável (IEDS) da Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (UNILAB), como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Energias.

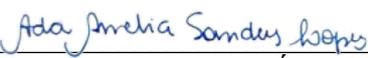
Aprovada em: 10/01/2023 .

BANCA EXAMINADORA



PROF^{DR.} JOSÉ CLEITON SOUSA DOS SANTOS

Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (UNILAB)



PROF^{a.} DR^{a.} ADA AMÉLIA SANDERS LOPES

Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (UNILAB)



PROF^{a.} DR^{a.} MARIA ALEXSANDRA DE SOUSA RIOS
Universidade Federal do Ceará (UFC)

*Em homenagem a minha querida
mãe Suzana Sonhe Dala, pelo amor incondi-
cional, por cada conselho dado, cada oração e
apoio em todos os momentos da minha vida.
Dedico todo o meu sucesso!!!*

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus, por mais uma vitória alcançada em minha vida, por ter me dado a estrutura para continuar os estudos, e por me ajudar a ultrapassar todas as dificuldades que surgiram no meio do caminho.

Aos meus pais, por fazerem até o que estava fora do vosso alcance para me proporcionarem o melhor que podiam.

À minha amada irmã Sonia Dala, pelo laço de amizade e companheirismo, e por estar sempre de prontidão na minha retaguarda para que eu não tropeçasse.

À minha segunda mãe, Camachi Dala, pelo amor, pela dedicação, pela paciência e pelo papel primordial que desempenhou na minha educação.

Aos meus irmãos, por todo apoio emocional e financeiro, por orarem e torcerem por mim mesmo à distância.

Aos meus amigos, especialmente ao Paulo Bumba por estar sempre disponível para me ajudar em todos os momentos.

Aos meus professores do curso de Engenharia de Energias, que a cada momento contribuíram para o meu aprendizado com a transmissão de conhecimento, apoio e compreensão durante a realização do curso.

Em especial, o professor e orientador Dr. José Cleiton Sousa dos Santos, a quem admiro pelo exemplo de profissional e de pessoa humana. Agradeço por ter me apresentado a área de pesquisa dessa produção acadêmica, me fazendo desenvolver um interesse viciante que aprofundarei durante o resto da minha vida acadêmica. Agradeço também pela sua orientação que me levou a adquirir conhecimentos e experiências que levarei e com certeza usarei durante a vida acadêmica e profissional.

Ao professor Vandiberto Pinto, pela oportunidade de poder fazer parte do grupo de pesquisa e pelos ensinamentos transmitidos durante as suas aulas e durante as pesquisas.

Aos meus colegas de caminhada no curso, pelo companheirismo, contribuição, compreensão, apoio e entusiasmo nessa caminhada de construção do conhecimento.

Ao IEDS, em especial a servidora Fabiana Valdevino, pela disponibilidade e prontidão para prestar a ajuda necessária sempre.

A FUNCAP, pela bolsa de iniciação científica.

A todos, o meu muitíssimo obrigado.

“Sempre que houver alternativas, tenha cuidado. Não opte pelo conveniente, pelo confortável, pelo respeitável, pelo honroso. Opte pelo que faz seu coração vibrar. Opte pelo que gostaria de fazer, apesar de todas as consequências”.

Osho

RESUMO

A produção de hidrogênio pode ser realizada a partir de uma quantidade alta e diversificada de matérias-primas, métodos e processos de melhoria. Nos últimos anos, estudos sobre produção de hidrogênio têm crescido e diversificado em larga extensão. A sua produção pode ser baseada em fontes renováveis, como a biomassa, ou em combustíveis fósseis como o petróleo. Esta análise bibliométrica focou em ilustrar a visão geral da pesquisa sobre a produção de hidrogênio, realizando um levantamento sistemático do estado atual da pesquisa, que pode ser usado por profissionais da indústria e pesquisadores interessados na área. Desta forma, foi realizada uma análise de 10.655 publicações da base de dados Web of Science Core Collection (2010 a 2022) usando os softwares VOSviewer, CiteSpace e Microsoft Excel. A lista das principais organizações que tiveram o maior número de publicações no campo de pesquisa da produção de hidrogênio inclui a Chinese Academy Of Sciences, a Ontario Tech University e a Xi An Jiaotong University. A revista com o maior número de publicações é a International Journal Of Hydrogen Energy. Além de organizações e revistas, foram analisados os autores e a literatura mais promissoras nesse campo de pesquisa. Por meio da análise de clusters, constatou-se que dois campos de busca constantes são a produção fotocatalítica de hidrogênio e a produção fermentativa de hidrogênio.

Palavras-chave: Análise bibliométrica. Artigos de revisão. Matérias-primas. Produção de hidrogênio.

ABSTRACT

Hydrogen production can be carried out from a high and diverse amount of raw materials, methods and improvement processes. In recent years, studies on hydrogen production have grown and diversified to a large extent. Its production can be based on renewable sources, such as biomass, or on fossil fuels such as petroleum. This bibliometric analysis focused on illustrating the research overview on hydrogen production, performing a systematic survey of the current state of research, which can be used by industry professionals and researchers interested in this area. In this way, an analysis of 10,655 publications from the Web of Science Core Collection database (2010 to 2022) was carried out using some software such as VOSviewer, CiteSpace and Microsoft Excel. The list of top organizations that have had the most publications in the field of hydrogen production research include the Chinese Academy Of Sciences, Ontario Tech University, and Xi An Jiaotong University. The journal with the largest number of publications is the International Journal Of Hydrogen Energy. In addition to organizations and journals, the most promising authors and literature in this research field were analyzed. Through cluster analysis, it was found that two constant search fields are photocatalytic hydrogen production and fermentative hydrogen production.

Keywords: Bibliometric analysis. Review articles. Hydrogen production. Feedstocks.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Publicações anuais relacionadas à pesquisa de produção de hidrogênio de janeiro de 2010 à janeiro de 2022.....	15
Figura 2: Critérios de pesquisa e condições de refinamento.....	17
Figura 3: Distribuição de publicações por país, com maior ênfase aos 25 países com pelo menos 5 publicações e 2000 citações	22
Figura 4: Mapa de visualização da rede baseado na colaboração entre os países.....	23
Figura 5: Mapa de visualização da rede baseado na colaboração entre as instituições.....	24
Figura 6: Mapa de visualização da rede baseado na colaboração entre os autores.....	25
Figura 7: Distribuição das áreas de pesquisa com interesse na produção de hidrogênio.....	28
Figura 8: Algumas matérias-primas usadas na produção de hidrogênio.....	29
Figura 9: Matérias-primas para Produção de hidrogênio: (A) Percentagem de artigos sobre matérias-primas específicas; e (B) Número de publicações mencionando diferentes matérias-primas nos respectivos títulos	30
Figura 10: Produção de hidrogênio a partir da água: (A) quantidade de publicações; e (B) evolução ao longo dos anos..	32
Figura 11: Produção de hidrogênio a partir de resíduos: (A) quantidade de publicações; e (B) evolução ao longo dos anos.....	35
Figura 12: Mapeamento da cocitação de palavras-chave na pesquisa de produção de hidrogênio da base de dados WoS.....	37

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: As 12 principais revistas em pesquisa de produção de hidrogênio no período de 2010 a 2022.....	20
Tabela 2: Os 12 países mais produtivos na área de produção de hidrogênio.....	21
Tabela 3: As 12 principais publicações com base em citações de 2010 a 2022.....	26
Tabela 4: Análise quantitativa das 24 palavras-chave usadas com maior frequência na pesquisa de produção de hidrogênio na base de dados WoS.	37
Tabela 5: Os cinco principais clusters de pesquisa de cocitação sobre matérias-primas para a produção de hidrogênio com base na análise do CiteSpace.....	40

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

CID	Identificação do Cluster
CPP	Citações Por Publicação
FI	Fator de Impacto
MCPA	Média de Citações Por Ano
MDPP	Média de Documentos Publicado por Ano
NS	Tamanho do Nó
P	País
Pr	Percentagem
TC	Total de Citações
TLS	Força Total do Link
TPs	Total de Publicações

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	14
2	OBJETIVOS.....	16
2.1	Objetivo geral.....	16
2.2	Objetivos específicos.....	16
3	MATERIAIS E MÉTODOS	17
3.1	Coleta de dados	17
3.1	Análise de dados	17
4	RESULTADOS.....	19
4.1	Análise bibliométrica.....	19
4.1.1	Análise quantitativa das tendências de publicação	19
4.1.2	Distribuição das revistas científicas	19
4.1.3	Distribuição por país e instituição.....	21
4.1.4	Análise quantitativa dos artigos citados	25
4.1.5	Áreas de Pesquisa	27
4.2	Matérias-primas para produção de hidrogênio	28
4.2.1	Classificação das matérias-primas.....	28
4.2.2	Água.....	31
4.2.3	Resíduos.....	33
4.2.4	Microalgas	35
4.3	Tópicos de pesquisa importantes	36
4.3.1	Análise quantitativa de palavras-chaves frequentes	36
4.3.2	Campos de pesquisa	38
4.3.3	Tendências emergentes.....	40
5	CONCLUSÃO.....	43
	REFERÊNCIAS	45

1 INTRODUÇÃO

O hidrogênio é o componente de inúmeros compostos químicos presentes na natureza e é essencial como combustível e para diversos processos químicos, como hidro craqueamento, hidrogenação e hidrotreatamento (BEHROOZSARAND; ZAMANIYAN; EBRAHIMI, 2010), na melhoria e dessulfuração de petróleo convencional (em refinarias de petróleo) e na produção de produtos químicos (amônia, metanol e produtos farmacêuticos). A quantidade de substâncias dispostas na natureza que contém hidrogênio é vasta, destacando-se a água. Além dela, o hidrogênio pode ser obtido de hidrocarbonetos fósseis, sulfeto de hidrogênio, biomassa e outras substâncias. As formas de energia para extração de hidrogênio das substâncias citadas acima podem ser divididas em quatro grupos: elétrica, térmica, bioquímica e fotônica (DINCER, 2012).

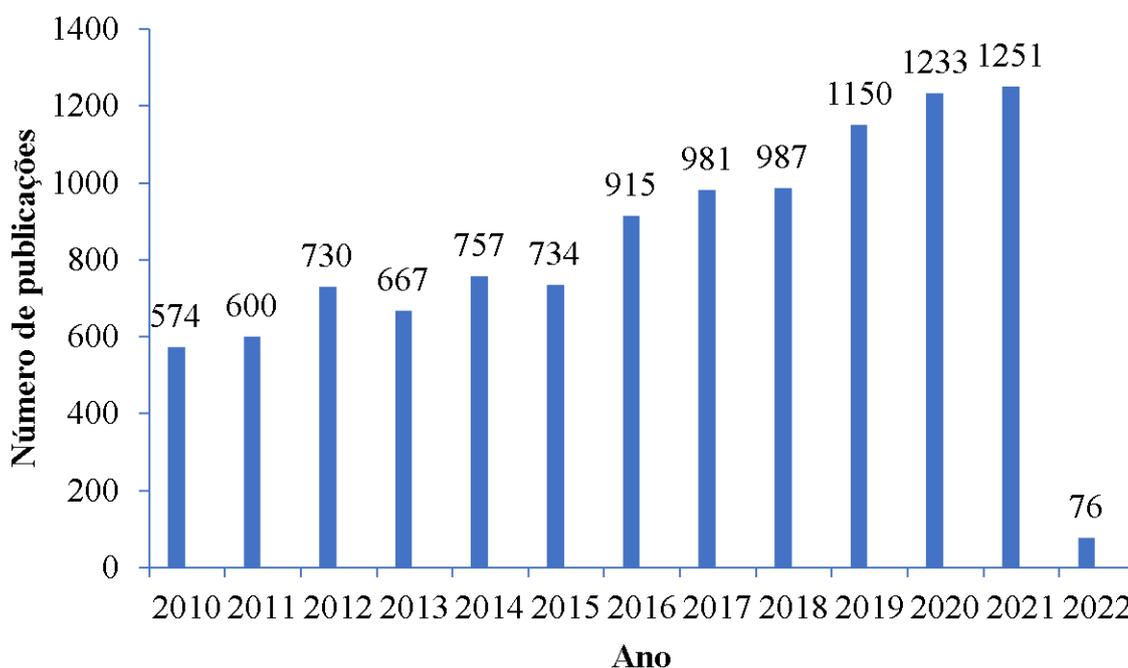
Existem vários métodos para a produção de hidrogênio, tais como, reforma a vapor de metano e outros hidrocarbonetos, gaseificação do carvão, eletrólise da água e termólise. Porém alguns desses métodos apresentam emissões de gases de efeito estufa (destacando-se o dióxido de carbono, metano, óxido nitroso) acentuadas. Anualmente, 70 milhões de toneladas de H₂ são produzidas, sendo que, 75 % é produzido a partir de gás natural e 23% a partir de carvão, apenas 2% é produzido por fontes renováveis, o que faz com que a maior parte da produção tenha uma emissão elevada de gases de efeito estufa (HURTUBIA; SAUMA, 2021).

Nos últimos anos a atenção dada aos efeitos do aquecimento global e assuntos relacionados com o fornecimento de energia tem crescido no mundo. As mudanças climáticas estavam ligadas ao crescimento da concentração de gases de efeito estufa, fazendo com que a redução dessas emissões se tornasse a principal preocupação ao lidar com a anomalia climática (CHANG et al., 2011). Diante desse cenário a obtenção de energia a partir de fontes renováveis se torna um aliado essencial face aos efeitos do aquecimento global, por isso a obtenção do hidrogênio por “rotas verdes” tem chamado a atenção de vários estudiosos interessados em pesquisas de produção mais limpa.

Pesquisas sobre produção de hidrogênio são datadas desde o início da década de 50, porém, ainda não voltadas a preocupação com os métodos de produção nem com a poluição do meio ambiente, a pesquisa mais antiga, tratava de baixas temperaturas na produção de hidrogênio (IPATIEFF; MONROE; FISCHER, 1950). O aumento de pesquisas relacionadas à produção de hidrogênio cresce significativamente nos últimos anos, passando de mais de 500 publicações por ano em 2010 para mais de 1000 publicações por ano em 2021 (Figura 1), sendo que o ano de 2022 apresenta um número muito reduzido de publicações porque foi considerado apenas o mês de janeiro. É notável o aumento do interesse na área de produção de hidrogênio,

porém, apesar da busca pelo título “Hydrogen Production” ter resultado em um número de publicações elevado em 2021, adicionando outras palavras-chave ao título (“ Bibliometr *' OR “Bibliometric Analysis” OR “Bibliometric map” OR “ Scientometric *” OR “Research Trends” AND “Hydrogen Production”) no banco de dados Web of Science, a pesquisa resultou em apenas 1 publicação, que é o artigo de Zhao et al. (ZHAO et al., 2020), ao pesquisar em todos os campos as mesmas palavras-chave, foram obtidos 61 resultados, sendo o primeiro publicado em 2005 (ANPO et al., 2005).

Figura 1 - Publicações anuais relacionadas à pesquisa de produção de hidrogênio de janeiro de 2010 à janeiro de 2022.



Fonte: O autor (2022).

Neste estudo, uma análise bibliométrica foi realizada para avaliar 10.655 publicações da base de dados Web of Science (WoS), do ano de 2010 a 2022, para entender os processos de desenvolvimento e as perspectivas futuras da pesquisa de produção de hidrogênio. A bibliometria é um método de avaliação de estudos de diferentes lugares do mundo, diferentes instituições e/ou diferentes autores, baseando-se em parâmetros como o número total de citações, número total de publicações, fator de impacto e vários outros parâmetros. Ela desempenha um papel importante para ilustrar a história de determinada área ou assunto, prever o futuro dessa área, tornando melhor a comunicação entre os pesquisadores (HUANG et al., 2022).

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

- Analisar, por meio de uma pesquisa bibliométrica, a produção científica referente à temática produção de hidrogênio no período de janeiro de 2010 à janeiro de 2022.

2.2 Objetivos específicos

- Analisar a cooperação e produção científica relacionada a pesquisa de produção de hidrogênio;
- Realizar um levantamento da produção científica da temática matérias-primas para produção de hidrogênio;
- Compreender os processos de desenvolvimento e as perspectivas futuras da pesquisa de produção de hidrogênio;
- Fornecer direções de pesquisas relevantes para interessados na produção de hidrogênio.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Coleta de dados

A base de dados Web of Science (WoS) [<https://www.webofscience.com>] foi utilizada para realizar as pesquisas deste trabalho, por ser considerada uma ferramenta de qualidade para gerar dados de citações para pesquisas científicas (HUANG et al., 2022). Inicialmente, utilizou-se o termo “Hydrogen Production” no campo título. O período foi definido de janeiro de 2010 a janeiro de 2022, com o objetivo de focar nos avanços mais recentes da pesquisa. Além disso, foi escolhido como idioma o inglês e os tipos de documentos foram refinados para “articles” (artigos), “review articles” (artigos de revisão) and “proceedings papers” (documentos de procedimentos). Após o refinamento foram obtidas 10.655 publicações para a análise bibliométrica, iniciando-se os downloads em 02 de fevereiro de 2022. O quadro dos critérios de busca da pesquisa é apresentado na Figura 2.

Figura 2 - Critérios de pesquisa e condições de refinamento.



Fonte: O autor (2022).

3.1 Análise de dados

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 (VAN ECK; WALTMAN, 2010). Foi utilizado para analisar os dados obtidos na WoS, permitindo a construção de mapas de revistas, países, instituições e autores

com base em dados de cocitação, e mapas de palavras-chave com base em dados de co-ocorrência. Permitindo a compreensão da organização dos clusters nesse campo.

As planilhas padrão do Microsoft Excel (Microsoft Office Professional Plus 2019) também foram utilizadas para análise, catalogação dos dados e geração de gráficos. Outro software utilizado foi o CiteSpace, com este programa, foi possível prever e identificar possíveis subáreas de pesquisas futuras nesta área por meio de clusters e palavras-chave(CHEN, 2006).

4 RESULTADOS

4.1 Análise bibliométrica

4.1.1 Análise quantitativa das tendências de publicação

Inicialmente, buscando pela palavra chave “Hydrogen Production” no Web of Science, sem a delimitação do período, obteve-se 14.728 documentos. Essa busca inicial foi realizada para obter o número total de publicações e compreender o início das pesquisas. O primeiro artigo foi publicado em janeiro de 1950, em que, Ipatieff, Monroe, and Fischer descreveram a conversão de metano e vapor em hidrogênio, dióxido de carbono e monóxido de carbono com temperatura na faixa de 470 °C a 790 °C e com diferentes catalisadores (IPATIEFF; MONROE; FISCHER, 1950). Da década de 50 para a década de 70 apenas 15 publicações foram registradas, ilustrando um interesse quase nulo na área de produção de hidrogênio nessa época, com menos de 1 publicação por ano. O cenário começou a mudar nos meados da década de 70, quando o número de publicações em 1975 atingiu 18 trabalhos, sendo que pesquisas relacionadas com os ciclos termoquímicos e a eletrolise para a produção de hidrogênio eram os principais focos naquele ano, nos primeiros 34 anos seguintes o aumento do interesse acadêmico nessa área se tornou significativo, sendo que a média de publicações foi mais de 113 por ano. Este aumento também está relacionado com a 1ª Conferência Mundial de Energia do Hidrogênio que decorreu em março de 1976 (DELL, 1979). De 2010 a 2022, o número médio de publicações subiu para mais de 819 artigos por ano. Esse crescimento está necessariamente ligado com o aumento das preocupações relacionadas com as condições ambientais e com a demanda por energia, resultando na procura por fontes renováveis de energia (KAIWEN; BIN; TAO, 2018).

4.1.2 Distribuição das revistas científicas

No total, são 1.345 revistas diferentes que albergam as publicações selecionadas, totalizando uma média de 7,9 artigos por revista e 0,66 artigos por revista por ano, esses números mostram o grande interesse científico que existe na área de produção de hidrogênio. A variedade de grupos científicos pesquisando sobre a área ilustra que a produção de hidrogênio é analisada a partir de vários pontos de vista diferentes, produzindo-se uma variedade muito ampla de artigos científicos. As 12 principais revistas científicas são ilustradas na Tabela 1, de acordo com a quantidade de publicações da área pesquisada. Fazendo uma análise quantitativa das publicações dessas 12 revistas, observa-se que concentram aproximadamente 43% do total de documentos identificadas. A revista “International Journal of Hydrogen Energy” é a primeira

da lista, apresentando 2.892 publicações, equivalente a mais de 27% do total de publicações analisadas, alcançando 75.723 citações.

Tabela 1 - As 12 principais revistas em pesquisa de produção de hidrogênio no período de 2010 a 2022

POSICÃO	TITULO DA REVISTA	TPs	Pr(%)	CPP	TC	MCPA	PAÍS	FI	MDPP
1	INTERNATIONAL JOURNAL OF HYDROGEN ENERGY	2892	27.142	26,18	75723	5408,79	Reino Unido	7,1	241
2	BIORESOURCE TECHNOLOGY	257	2.412	35,71	9179	706,08	Holanda	11,9	21
3	APPLIED CATALYSIS B ENVIRONMENTAL ENERGY	241	2.262	55,01	13259	1019,92	Holanda	24,3	20
4	CONVERSION AND MANAGEMENT	155	1.455	29,09	4510	346,92	Reino Unido	11,5	13
5	JOURNAL OF MATERIALS CHEMISTRY A	151	1.417	47,76	7212	721,2	Reino Unido	14,5	13
6	RSC ADVANCES	141	1.323	18,46	2603	236,64	Reino Unido	4,0	12
7	CHEMICAL ENGINEERING JOURNAL	137	1.286	27,45	3761	313,42	Suíça	16,7	11
8	ENERGY	124	1.164	22,73	2819	216,85	Reino Unido	8,9	10
9	APPLIED SURFACE SCIENCE	114	1.070	25,26	2880	261,82	Holanda	7,4	10
10	INTERNATIONAL JOURNAL OF ENERGY RESEARCH	110	1.032	15,99	1759	135,31	Reino Unido	4,7	9
11	CATALYSIS TODAY	106	0,995	23,47	2488	191,38	Holanda	6,6	9
12	APPLIED ENERGY	105	0,985	29,83	3133	261,08	Reino Unido	11,5	9

Fonte: O autor (2022).

Apesar do destaque na quantidade total de publicações e citações, atualmente, essa revista apresenta o quarto menor fator de impacto da lista das 12 principais revistas, isso ocorre porque o fator de impacto de um determinado ano depende da quantidade de citações e do

número de itens citáveis dos últimos dois anos. Nesse caso os fatores de impacto apresentados na Tabela 1 são referentes ao ano de 2021. Em segundo lugar tem a revista “Bioresource Technology” com 257 publicações, 9.179 citações e um fator de impacto de 11,9, esse valor é menor do que o fator de impacto da revista “Applied Catalysis B Environmental”, que ocupa a terceira posição, essa revista possui o maior fator de impacto da lista, com um valor de 24,3, um número de publicações igual a 241 e 13.259 citações.

4.1.3 Distribuição por país e instituição

Foram considerados como o País e a instituição de origem dos trabalhos aqueles informados pelos autores no campo de afiliação. No total, 104 países contribuíram para a produção das 10655 publicações, um fato que ilustra o vasto interesse pela área. Apesar de serem 104 países no total, 12 países foram responsáveis por 88,45% do total de publicações, tal como é apresentado na Tabela 2. O maior número de publicações está concentrado na China (3773 publicações, cerca de 35,4% do total), seguido por EUA (984 publicações, cerca de 9,2% do total) e Coreia do Sul (698 publicações, cerca de 6,5% do total). O destaque desses países deve-se provavelmente por estarem na mesma frente da descarbonização.

Tabela 2 - Os 12 países mais produtivos na área de produção de hidrogênio.

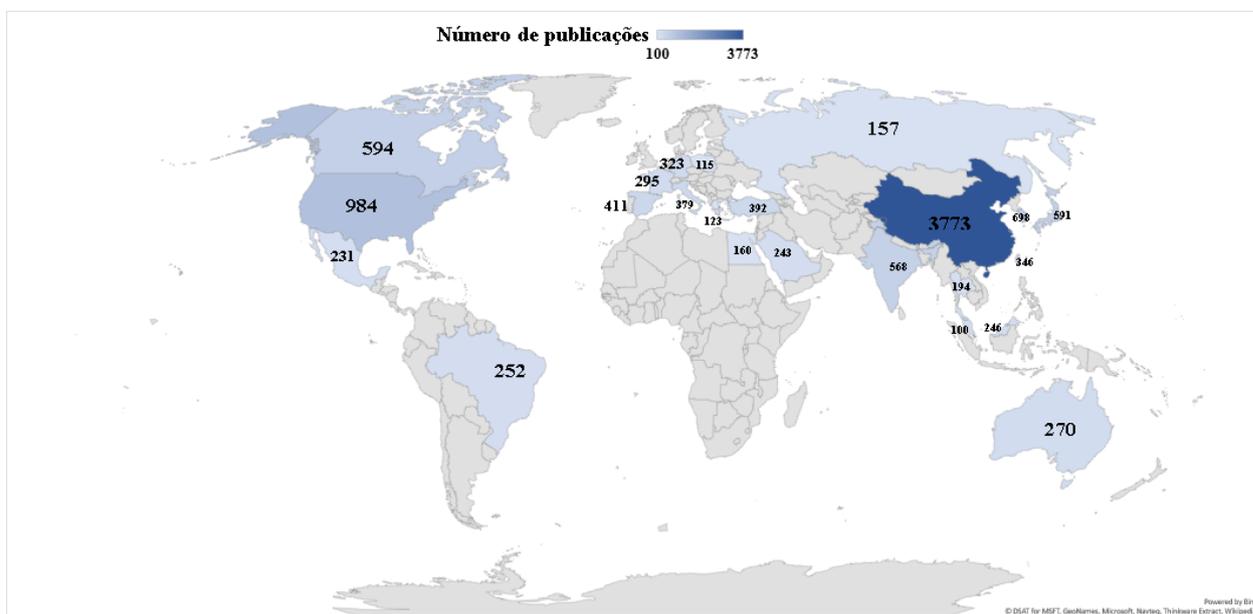
POSIÇÃO	PAÍS	TPs	Pr(%)	TC	CPP	MCPA	Índice H
1	CHINA	3773	35.411	109167	28,93374	7797,64	124
2	EUA	984	9.235	41651	42,32825	3203,92	94
3	COREIA DO SUL	698	6.551	15913	22,79799	1224,08	58
4	CANADÁ	594	5.575	18028	30,35017	1386,77	62
5	JAPÃO	591	5.547	18289	30,94585	1406,85	65
6	ÍNDIA	568	5.331	13871	24,42077	1067	56
7	ESPANHA	411	3.857	13583	33,04866	1044,85	60
8	PERU	392	3.679	8052	20,54082	619,38	45
9	ITÁLIA	379	3.557	10671	28,15567	820,85	52

10	IRÃ	365	3.426	7482	20,49863	575,54	45
11	TAIWAN	346	3.247	9299	26,87572	715,31	48
12	ALEMANHA	323	3.031	12102	37,46749	930,92	56

Fonte: O autor (2022).

Os países citados anteriormente apresentaram o maior número de publicações, porém, EUA apresentou o maior valor médio de citações, seguido pela Espanha, Japão e Canadá, apesar da proximidade dos valores médios desses dois últimos. A Figura 3 apresenta a distribuição das publicações por país de acordo com o período e área de pesquisa, com maior ênfase aos 29 países que apresentaram no mínimo 5 publicações e 2000 citações. É possível observar os diferentes tons de cor apresentadas no mapa da Figura 3, ilustrando os países com maior número de publicações com uma tonalidade mais densa em relação aos outros países.

Figura 3 - Distribuição de publicações por país, com maior ênfase aos 25 países com pelo menos 5 publicações e 2000 citações.

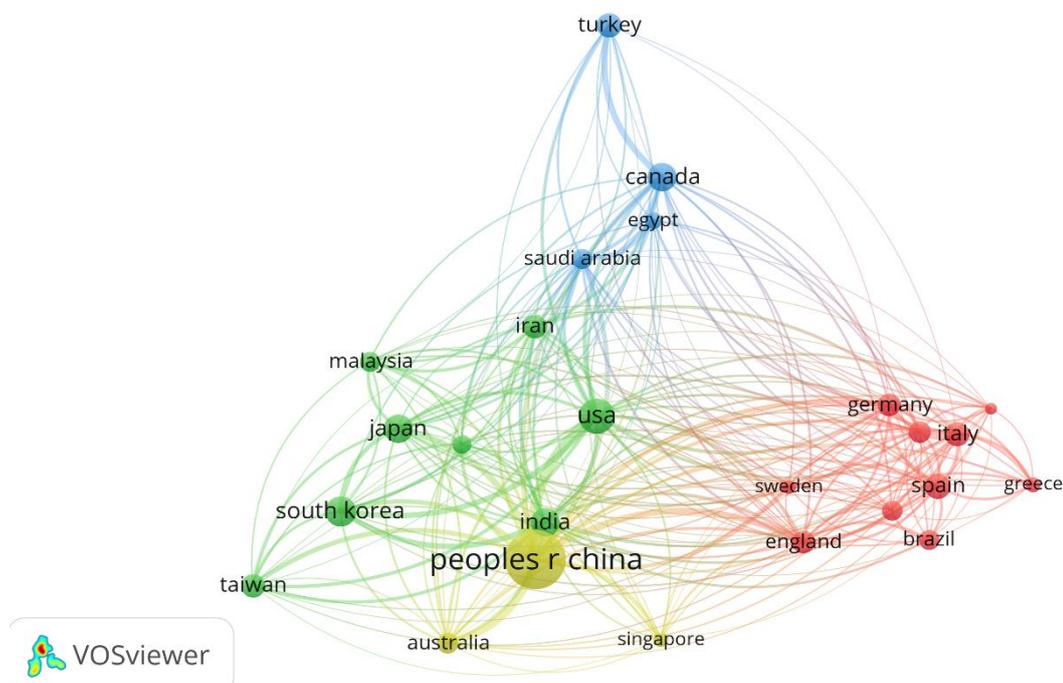


Fonte: O autor (2022).

A Figura 4 apresenta um mapa de rede de ligações colaborativas entre os grupos científicos. Analisando a figura 4, a China e o EUA são os países mais colaborativos no campo, é fácil entender o interesse dessas duas potências na área de hidrogênio, devido a procura por

fontes limpas e renováveis de energia, e devido também a aposta em veículos elétricos e na descarbonização dos transportes.

Figura 4 - Mapa de visualização da rede baseado na colaboração entre os países.

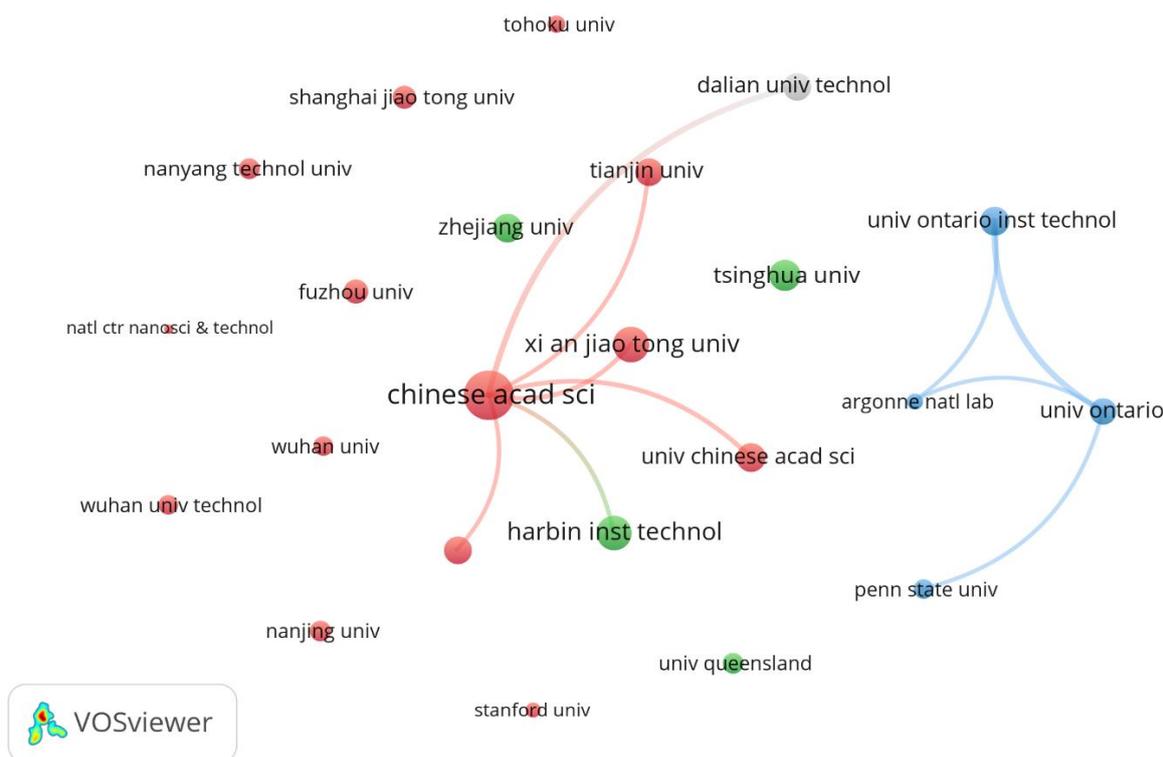


Fonte: O autor (2022).

A análise demonstrou que um total 4089 instituições de 104 países diferentes foram responsáveis pelos trabalhos publicados. Esses dados ilustram o alto nível de interesse nessa área em várias partes do mundo. Apesar de haver um grande número de instituições interessadas na área, 1902 instituições (cerca de 46,5% do total de instituições) possuem apenas 1 publicação na área, apresentando uma taxa de dispersão institucional muito alta e ilustrando que apenas cerca de 53,5% do total de instituições realizam pesquisas de forma consistente nessa área. Apesar disso, a análise da importância relativa da pesquisa institucional pode ser complicada. Por exemplo, a Wuhan University of Technology(China), o National Center for Nanoscience (China) e Technology and the Chinese Academy of Sciences(China) publicaram juntos um artigo que atualmente possui 1978 citações e ocupa o primeiro lugar entre 12 artigos mais citados na área(CHU et al., 2018), ilustrando a grande importância de coautoria entre as instituições, por outro lado, a Hanbat National University (Coreia do Sul), National Renewable Energy Laboratory (EUA) e Kyungpook National University (Coreia do Sul) publicaram juntas um artigo

que possui apenas 1 citação (JO et al., 2010), ilustrando que a coautoria institucional não é o único fator determinante para a relevância de uma publicação, mas também a qualidade da pesquisa científica construída, essa afirmação pode ser confirmada com a análise do caso da University of Western Australia (Australia), que publicou um artigo que possui 1763 citações e está entre os 12 artigos mais citados na área (ZENG; ZHANG, 2010). Mapas de rede adicionais também foram construídos para entender melhor a interconexão entre as instituições mais influentes, ilustradas na Figura 5. Para tal, foram selecionadas as instituições que possuem no mínimo 2300 citações acumuladas pelo total de publicações no período em análise, tendo sido identificados 26 instituições (0,64% do total de instituições), onde destacam-se a Chinese Academy of science, Harbin Institute of Technology e Xi An Jiaotong University.

Figura 5 - Mapa de visualização da rede baseado na colaboração entre as instituições.



Fonte: O autor (2022).

Em relação aos autores, 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 no mínimo 20 publicações e 800 citações, obteve-se 27 autores. Dentre eles, destaca-se o Dincer I, com o maior número de

importante destacar que os sete autores deste artigo são do mesmo país (China). A segunda publicação mais citada é uma revisão da literatura sobre o estado da tecnologia e do conhecimento da produção de hidrogênio por eletrolise da água, apontando também os pontos necessários a serem melhorados (ZENG; ZHANG, 2010), esta revisão teve dois autores também do mesmo país (Austrália) e obteve 1763 citações. O terceiro artigo mais citado obteve 1028 citações, e os seus quatro autores são também do mesmo país (Suíça), este artigo aborda sobre o uso de filmes de sulfetos de molibdênio como catalisadores para produção de Hidrogênio por método eletroquímico.

É importante realçar que não existe uma relação direta entre as publicações mais citadas (Tabela 3) e as revistas mais citadas (Tabela 1), pois apenas o International Journal Of Hydrogen Energy e Journal Of Materials Research surgem nas duas listas e em posições diferentes. É possível observar também, a predominância de trabalhos ligados a produção de hidrogênio fotocatalítico (CHEN et al., 2021; RAN et al., 2017; ROSA; MAZZOTTI, 2022), ilustrando um interesse especial por esse tipo de material por parte da comunidade científica, provavelmente por ser considerado promissor. Uma das características que os artigos mais citados apresentam é o período de publicação, a maioria dos artigos mais citados foi publicada a mais de 10 anos, apesar de um artigo de 2017 ocupar a sexta posição da lista dos doze artigos mais citados (RAN et al., 2017), indicando que o interesse por trabalhos relacionados à produção de hidrogênio fotocatalítico permanece alto.

Tabela 3 - As 12 principais publicações com base em citações de 2010 a 2022

CITAÇÕES	ANO	AUTOR	TÍTULO	REVISTA	PAÍS
1978	2011	Li	Highly Efficient Visible-Light-Driven Photocatalytic Hydrogen Production of CdS-Cluster-Decorated Graphene Nanosheets	JOURNAL OF THE AMERICAN CHEMICAL SOCIETY	China
1763	2010	Zeng	Recent progress in alkaline water electrolysis for hydrogen production and applications	PROGRESS IN ENERGY AND COMBUSTION SCIENCE	Austrália
1028	2011	Merki	Amorphous molybdenum sulfide films as catalysts for electrochemical hydrogen production in water	CHEMICAL SCIENCE	Suíça
998	2010	Zuo	Self-Doped Ti ³⁺ Enhanced Photocatalyst for Hydrogen Production under Visible Light	JOURNAL OF THE AMERICAN CHEMICAL SOCIETY	EUA

986	2015	Wu	Porous molybdenum carbide nano-octahedrons synthesized via confined carburization in metal-organic frameworks for efficient hydrogen production	NATURE COMMUNICATIONS	Singapura
956	2017	Ran	Ti ₃ C ₂ MXene co-catalyst on metal sulfide photo-absorbers for enhanced visible-light photocatalytic hydrogen production	NATURE COMMUNICATIONS	Austrália
949	2010	Yu	Hydrogen Production by Photocatalytic Water Splitting over Pt/TiO ₂ Nanosheets with Exposed (001) Facets	JOURNAL OF PHYSICAL CHEMISTRY C	China
946	2011	Murdoch	The effect of gold loading and particle size on photocatalytic hydrogen production from ethanol over Au/TiO ₂ nanoparticles	NATURE CHEMISTRY	Escócia
932	2015	Dincer	Review and evaluation of hydrogen production methods for better sustainability	INTERNATIONAL JOURNAL OF HYDROGEN ENERGY	Canadá
830	2016	Hosseini	Hydrogen production from renewable and sustainable energy resources: Promising green energy carrier for clean development	RENEWABLE & SUSTAINABLE ENERGY REVIEWS	Malásia
827	2010	Chen	Accelerating materials development for photoelectrochemical hydrogen production: Standards for methods, definitions, and reporting protocols	JOURNAL OF MATERIALS RESEARCH	EUA
823	2011	Tedsree	Hydrogen production from formic acid decomposition at room temperature using an Ag-Pd core-shell nanocatalyst	NATURE NANOTECHNOLOGY	Inglaterra

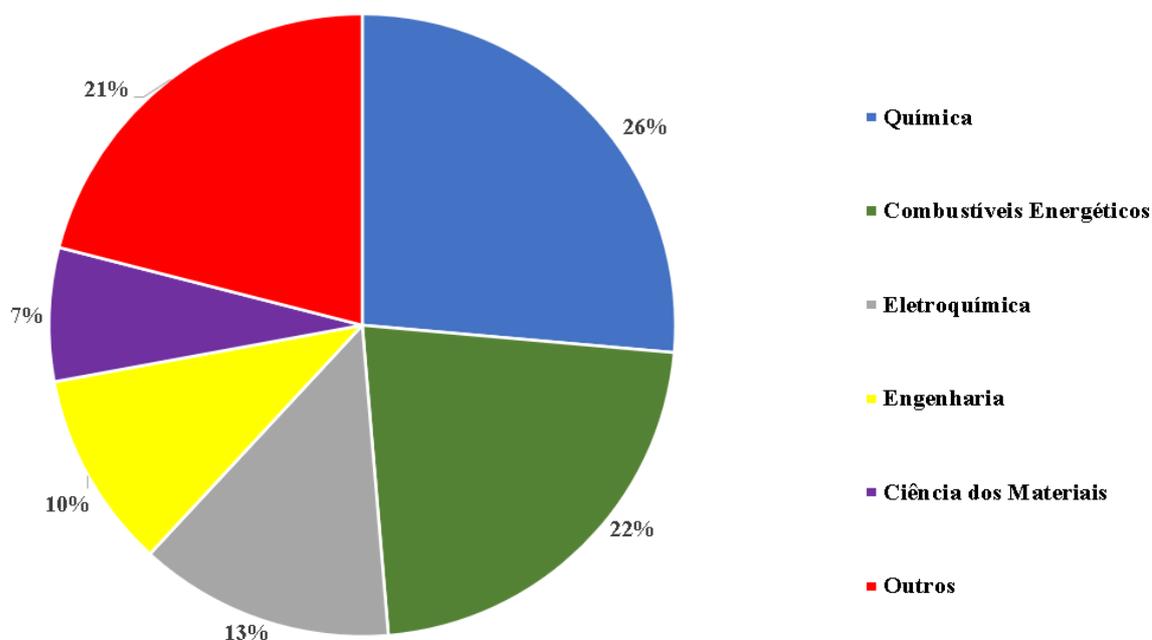
Fonte: O autor (2022).

4.1.5 Áreas de Pesquisa

Os artigos analisados sobre a produção de hidrogênio estão agrupados num total de 67 áreas de pesquisas na base de dados Web of Science, muitos artigos estão incluídos em mais de uma área de pesquisa, por isso existem mais de 30 áreas de pesquisa com menos de 10 artigos sobre a produção de hidrogênio. A Figura 7 apresenta as 5 principais áreas de pesquisa, que

abrigam 79% dos artigos publicados. Cerca de 6.351 artigos foram registrados na área de pesquisa " Chemistry" (Química), tornando-se a área de pesquisa mais comum, envolvendo processos fotossintéticos e fotocatalíticos para produção de hidrogênio. Em seguida, a área de pesquisa "Energy fuels" (Combustíveis energéticos), com 5.356 registros, envolvendo pesquisas sobre produção de hidrogênio a partir de hidrocarbonetos de petróleo; "Electrochemistry" (Eletroquímica), com 3.173 registros, envolvendo dispositivos fotovoltaicos e análise da produção eletroquímica de hidrogênio; e "Engineering" (Engenharia) com 2.461 registros, envolvendo pesquisa tecnológica para produção de hidrogênio. A variedade de áreas de pesquisa ilustra diversos atores na cadeia de conhecimento da produção de hidrogênio.

Figura 7 - Distribuição das áreas de pesquisa com interesse na produção de hidrogênio.



Fonte: O autor (2022).

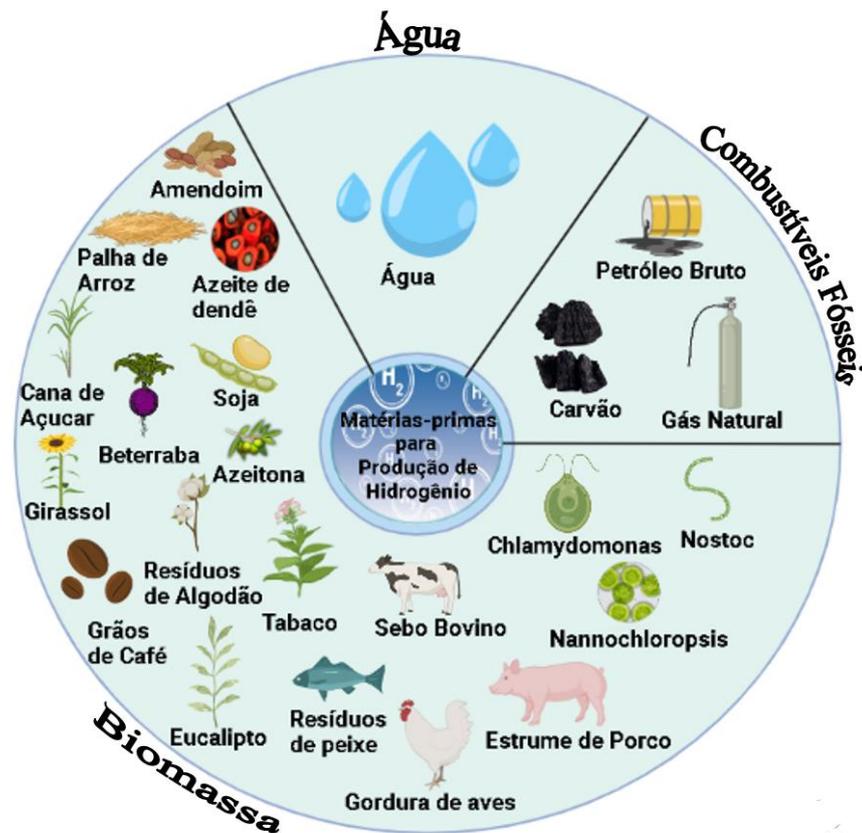
4.2 Matérias-primas para produção de hidrogênio

4.2.1 Classificação das matérias-primas

Existe uma grande variedade de matérias-primas para a produção de hidrogênio. No entanto, podem ser classificados em 2 categorias ilustradas na Figura 8, combustíveis fósseis e recursos renováveis (água, biomassa). É fundamental destacar que algumas biomassas usadas 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 (ROSA; MAZZOTTI, 2022). Portanto, o uso de biomassa mais sustentável e menos competitiva, como resíduos de alimentos domésticos, resíduos de colheitas, esterco de gado e biomassa aquática, está se tornando mais atraente. As matérias-primas da categoria de recursos renováveis podem ser encontradas em vários locais do mundo. Para biomassas comestíveis, apesar da alta competitividade, alguns exemplos podem ser citados, como casca de arroz, talo de trigo, casca de amendoim, talo de milho, sabugo de milho e talo de sorgo (LU et al., 2006). 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* (LOPEZ-HIDALGO; SMOLIŃSKI; SANCHEZ, 2022).

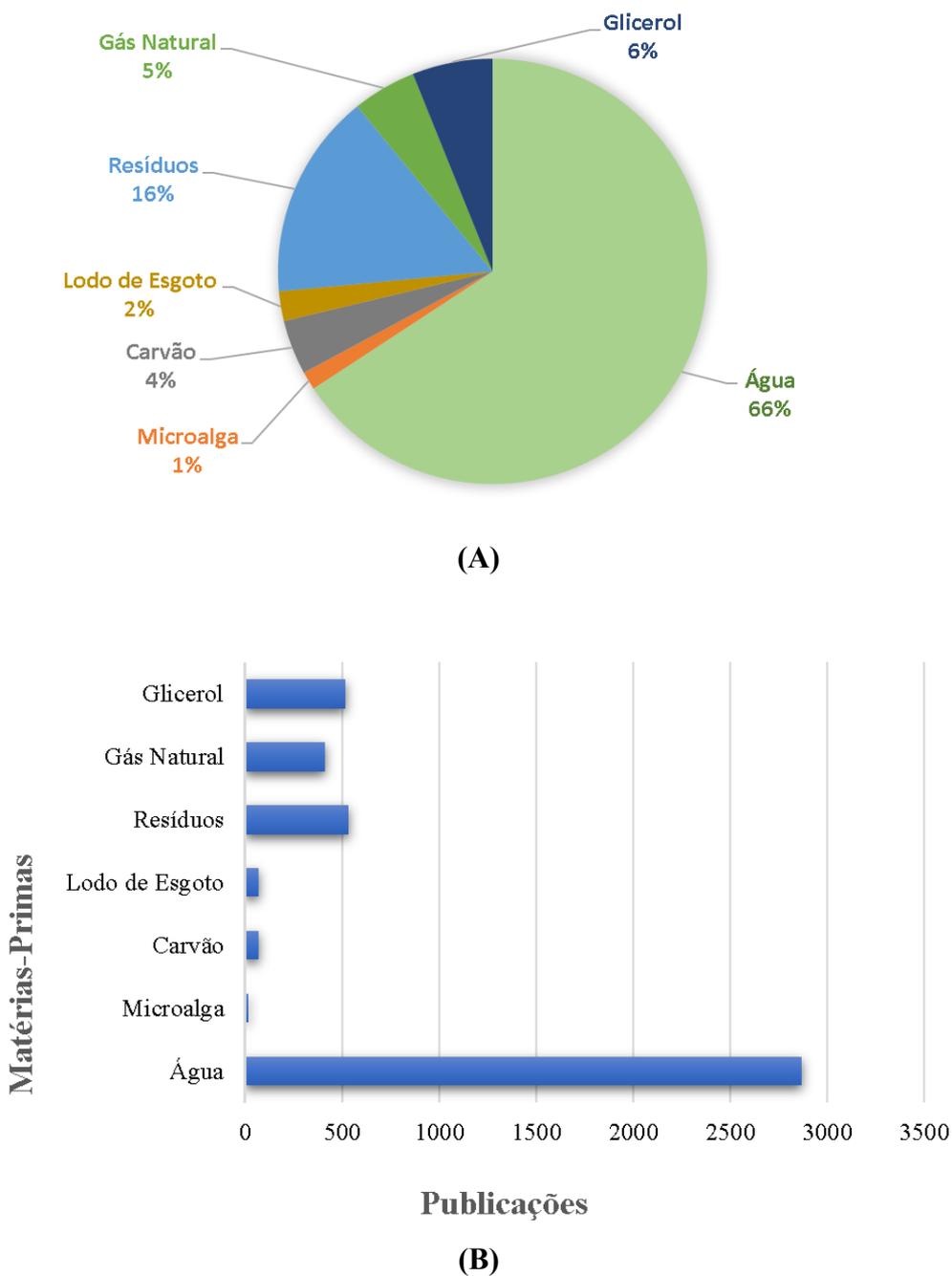
Figura 8 -Algumas matérias-primas usadas na produção de hidrogênio.



Fonte: O autor (2022).

Dentre os recursos renováveis observados, os provenientes da água e da biomassa são as mais relevantes entre 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.

Figura 9 - Matérias-primas para Produção de hidrogênio: (A) Percentagem de artigos sobre matérias-primas específicas; e (B) Número de publicações mencionando diferentes matérias-primas nos respectivos títulos.



Fonte: O autor (2022).

É importante observar que os critérios de refinamento utilizados neste caso foram os mesmos da busca inicial, porém acrescentando o operador lógico “AND” e utilizando os seguintes termos de busca no campo da palavra-chave: ("Biomass" OR "feedstock" OR "fossil" OR " Water"). Algumas publicações que têm a água como objeto principal de estudo estão listadas na tabela 3, que lista os 12 artigos mais citados, sendo que uma dessas publicações ocupa o primeiro lugar entre os artigos mais citados. Usando “Biomass” como palavra-chave, a publicação mais citada para este caso também está na lista de artigos mais citados, ocupando a nona posição, este artigo analisa os métodos de produção de hidrogênio visando uma melhoria na sustentabilidade e os autores focam sobre os aspectos ambientais, técnicos, financeiros e sociais de 19 diferentes métodos de produção de hidrogênio, fazendo uma avaliação comparativa (DINCER; ACAR, 2014). Esta publicação obteve 932 citações no período analisado. A Figura 9 ilustra o nível de ocorrência de algumas matérias-primas utilizadas na produção de hidrogênio presentes nos 3.530 documentos analisados. É possível observar pelo gráfico que a água e os resíduos, como mencionado anteriormente, ocupam posições de destaque nas publicações. As microalgas são as matérias-primas com menor número de artigos dentre as analisadas, pois o interesse por essas matérias-primas ainda é crescente e talvez ganhe mais destaque na literatura científica.

4.2.2 Água

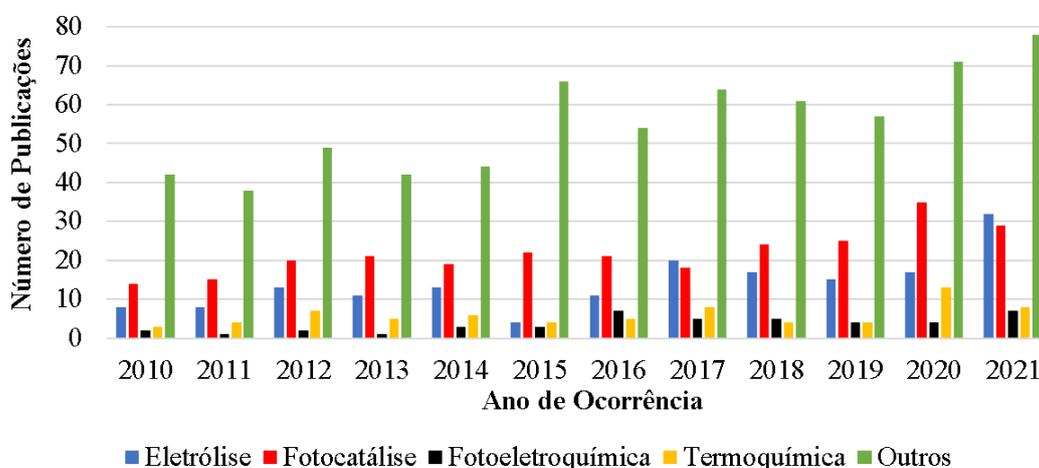
A natureza inflamável do gás hidrogênio, que quando queimado produz água, foi descoberta por Henry Cavendish em 1766. A cerca de 150 anos atrás, o francês Júlio Verne previu que o hidrogênio seria introduzido a partir da água como fonte de energia renovável em vez de combustível. fóssil (SEO; KIM, 2018). Atualmente, a produção de hidrogênio a partir da água é uma realidade, podendo ser produzido por diversos métodos e utilizando várias fontes diferentes.

A Figura 10 apresenta alguns métodos utilizados em publicações sobre produção de hidrogênio usando água e o interesse de pesquisa nesses métodos nos últimos 10 anos. O método que se destaca é o método fotocatalítico. Nesse método, os materiais que atuam como fotocatalisadores absorvem fótons do espectro de luz visível fazendo com que os elétrons de valência sejam excitados e saltem para a banda de condução, deixando buracos na banda de valência, esses elétrons e buracos fotoinduzidos são trazidos para a superfície do catalisador e participam da redução e oxidação das moléculas de água adsorvidas (TENTU; BASU, 2017).

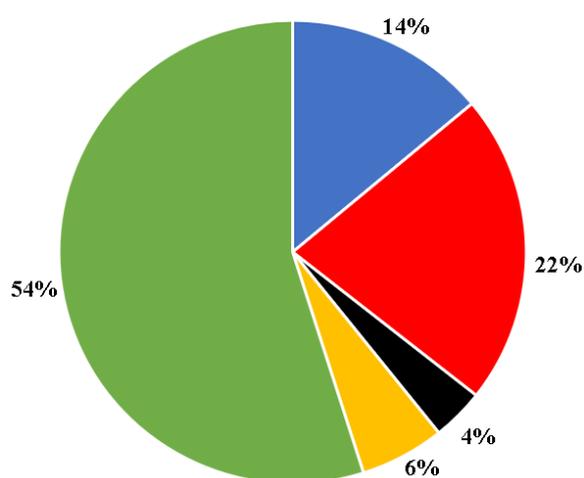
A produção de hidrogênio por eletrólise da água também é um método com uma quantidade considerável de Publicações. A unidade de eletrólise da água mais simples consiste em

um cátodo e um ânodo imersos em um eletrólito condutor e conectados por uma fonte de alimentação externa. Quando uma corrente contínua é aplicada, no processo geral, os íons de hidrogênio se movem em direção ao cátodo, os íons de hidróxido se movem em direção ao ânodo e os receptores de gás são usados para coletar os gases hidrogênio e oxigênio. Para pequenos sistemas de produção, o custo das células de eletrólise é o fator que determina o custo do hidrogênio eletrolítico.

Figura 10 - Produção de hidrogênio a partir da água: (A) quantidade de publicações; e (B) evolução ao longo dos anos.



(A)



(B)

Fonte: O autor (2022).

Por outro lado, para grandes sistemas, o custo da eletricidade determina o valor do hidrogênio. Apesar de ser um método conhecido há cerca de 200 anos, a produção de hidrogênio ainda carece de melhorias em segurança, durabilidade, portabilidade, eficiência energética, taxa de liberação de hidrogênio, operacionalidade e um dos pontos principais, a redução de custos de instalação e operação. Para isso, muitos esforços estão sendo feitos atualmente (ANWAR et al., 2021; SANTOS; SEQUEIRA; FIGUEIREDO, 2013). Um dos exemplos são os estudos para integrar tecnologias renováveis como fonte de energia na eletrólise da água para produção de hidrogênio (AWALEH et al., 2022; AYODELE; MUNDA, 2019; BURTON et al., 2021; CHEN-NOUF et al., 2012; DE FÁTIMA PALHARES; VIEIRA; DAMASCENO, 2018). Alguns pesquisadores também investigam a influência do magnetismo na eficiência da produção de hidrogênio pela eletrólise da água (LIN; HOURNG; HSU, 2017; LIN; HOURNG; KUO, 2012; LIN; HOURNG; WU, 2017; PURNAMI et al., 2020). O método de eletrólise da água acomoda vários processos, como eletrólise da água com membrana de troca de prótons, eletrólise da água com óxido sólido, eletrólise da água alcalina e eletrólise da água com membrana de troca de ânions alcalinos (CHI; YU, 2018).

4.2.3 Resíduos

A pesquisa pela palavra chave “Waste” apresenta um número razoável de publicações em relação às outras palavras pesquisadas, foram identificadas 529 publicações, porém devido a diversidade de resíduos que podem ser usados é possível especificar mais o tipo de resíduo durante as pesquisas. Alguns estudos realizados usaram resíduos de chá para a obtenção de gás rico em hidrogênio, uma das pesquisas usou resíduos de chá obtido na Turquia, um dos maiores produtores de plantas de chá no mundo, neste estudo foram feitas análises do efeito da razão de catalisador, da temperatura e do tempo de reação, os autores obtiveram um rendimento máximo de H₂ de 3,55 mol H₂/kg de resíduo de chá em temperatura de 850 °C e reação de 15 minutos de duração (AYAS; ESEN, 2016).

Um outro estudo focou-se nos resíduos de banana, que são uma fonte abundante na Indonésia, sendo este inserido entre os 10 principais países produtores de banana. No processo de colheita, resíduos como folhas, caule e cascas de bananeira, sobram em quantidade elevada, pois a bananeira não pode ser colhida novamente. Aproveitando o alto teor de celulose no pseudocaule da banana, estudiosos usaram também outros componentes da bananeira para comparar as taxas de produção de gás em relação ao pseudocaule (PUTRA et al., 2022).

Alguns estudos realizaram pesquisas sobre a produção de hidrogênio a partir de cultura, comida e resíduos de gado, esses resíduos têm uma abundância elevada. No caso da

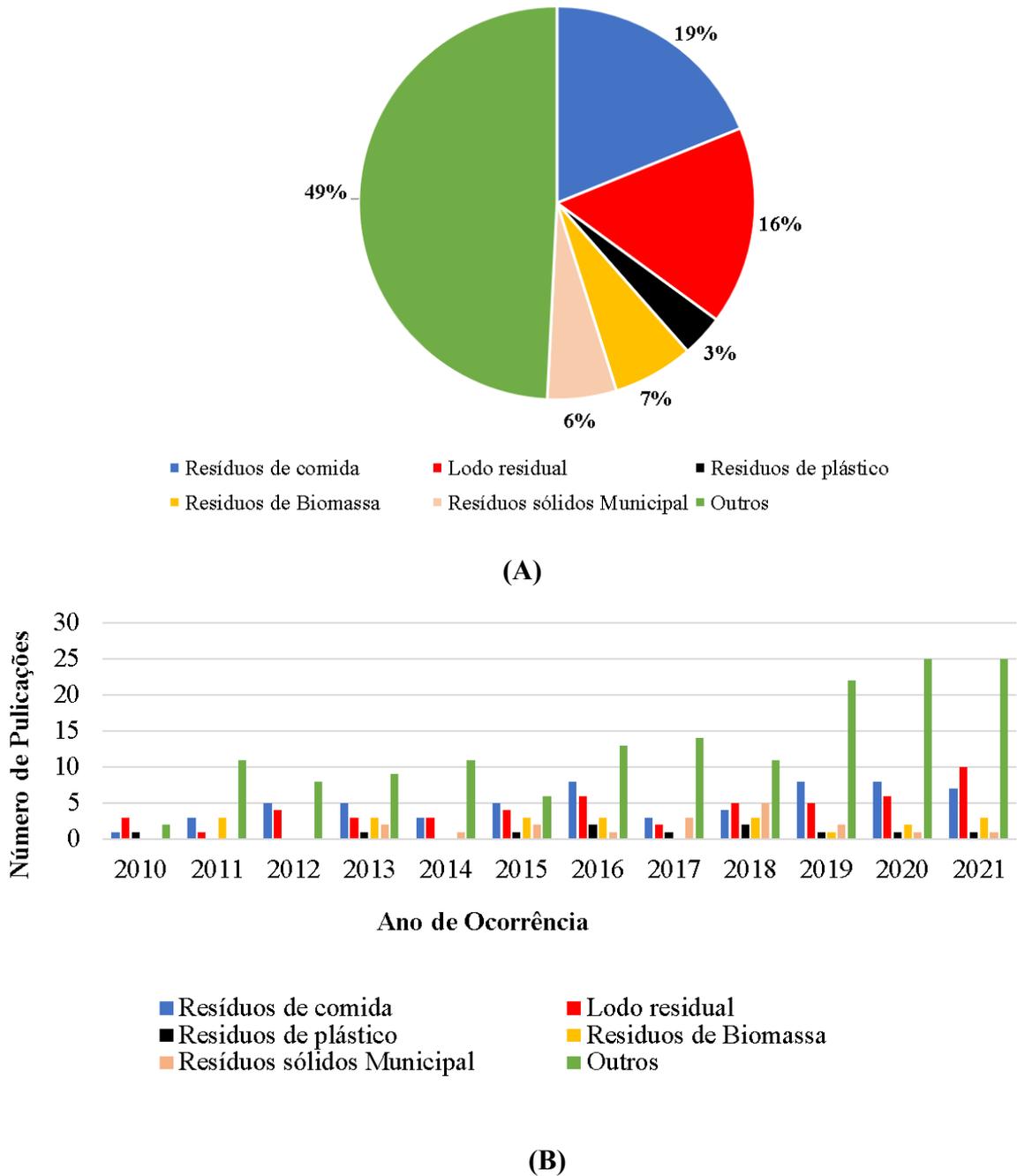
Europa Central, 0,7 bilhão de toneladas de resíduos agrícolas e florestais foram gerados entre 1998 e 2001. Os resíduos de alimentos tornaram-se um tópico de pesquisa relevante para a produção de hidrogênio, pois um dos problemas ambientais mais graves do mundo são os resíduos de alimentos. Estima-se que mais de um bilhão de toneladas de resíduos de alimentos sejam gerados por ano, cerca de 33% da produção anual global de alimentos.

Por esta razão, um dos principais desafios globais tem sido a eliminação e utilização de resíduos alimentares. No entanto, alguns desafios devem ser superados para usar esses resíduos na produção de hidrogênio(ANGERIZ-CAMPOY; ÁLVAREZ-GALLEGO; ROMERO-GARCÍA, 2015). Alguns desafios podem ser citados, como a estabilidade dos resíduos de alimentos devido à variação de composição com a estação e a cultura do país, a separação do lixo que é um problema grave nos países em desenvolvimento, o acúmulo de ácidos graxos voláteis e a acidificação do sistema. Para estes dois últimos desafios, a mistura de resíduos alimentares e frações orgânicas de resíduos sólidos urbanos foi apresentada como solução proposta (WANG et al., 2018; WU; WILLIAMS, 2010).

Os estudos sobre o uso de lodo ativado a partir de resíduos produzidos em grandes quantidades durante o tratamento biológico de efluentes também aumentaram muito, com 60% dos custos operacionais totais das estações de tratamento de efluentes sendo gastos no tratamento e disposição do lodo. Os altos teores de proteínas e carboidratos chamam a atenção para seu uso como substratos para a produção de hidrogênio. Devido ao baixo rendimento de hidrogênio da fermentação escura do lodo ativado, os pesquisadores têm se concentrado em otimizar os métodos de pré-tratamento do lodo, as condições operacionais ou a composição do lodo (WANG et al., 2018). Por exemplo, foi realizado um estudo para analisar o efeito de polihidroxicanoatos, um polímero, na produção de hidrogênio fermentativo escuro a partir de lodo de resíduo ativado. Os autores observaram uma relação direta entre o teor de polihidroxicanoatos e o volume de hidrogênio produzido e uma relação inversa entre o teor de polihidroxicanoatos e o tempo de fermentação do resíduo (WU; WILLIAMS, 2010).

A Figura 11 mostra o crescimento das publicações relacionadas ao aproveitamento de resíduos para a produção de hidrogênio nos últimos 10 anos. Além dos resíduos já relatados, vários outros resíduos representam mais de 40% dos artigos publicados sobre o assunto, podendo ser citados como exemplos alguns artigos como resíduos de jornal(HIBINO et al., 2018) e resíduos de alumínio(SETIANI et al., 2018).

Figura 11 - Produção de hidrogênio a partir de resíduos: (A) quantidade de publicações; e (B) evolução ao longo dos anos.



Fonte: O autor (2022).

4.2.4 Microalgas

A busca por “Microalgae” como matéria-prima para produção de hidrogênio apresenta poucas publicações, ilustrando um baixo nível de interesse de pesquisa. No entanto, as poucas publicações analisadas apresentam inúmeras vantagens no uso de microalgas como

matéria-prima para a produção de hidrogênio. As microalgas podem produzir hidrogênio diretamente de fontes de energia renováveis. Outra característica delas é que agem em pressão e temperatura ambientes, são neutras em carbono e não precisam de bases elétricas intermediárias. Além disso, elas também apresentam vantagens sobre as biomassas terrestres, como a capacidade de crescer em ambientes não favoráveis para biomassas terrestres, maior taxa de crescimento, aquisição mais eficiente de nutrientes e conversão de energia solar (AZIZ; ODA; KASHIWAGI, 2014). Devido à facilidade de produção de lipídios em grandes quantidades e curtos períodos, o potencial de conversão em biocombustíveis como bio-óleo, biohidrogênio, biodiesel e biogás é alto. Diversas microalgas são geneticamente dotadas de hidrogenase para produção de hidrogênio, podendo-se destacar algumas cepas, como *Chlorella fusca*, *Chlamydomonas reinhardtii*, *Scenedesmus obliquus*, *Platymonas subcordiformis*, *Chlorococcum littorale*, entre outros (EROGLU; MELIS, 2011).

A produção de hidrogênio usando microalgas é também cercada por desafios que podem ser superados se o interesse por essas matérias-primas aumentar. Os principais obstáculos na produção de hidrogênio são a baixa concentração de biomassa na cultura de microalgas, a elevada quantidade de água na biomassa das microalgas que requer consumo de energia maior para o processo de secagem, e a sensibilidade do oxigênio à hidrogenase. Por outro lado, a questão da produção de biohidrogênio ter pouco reconhecimento em escala industrial e a existência de fatores limitantes na produção de hidrogênio, como altos custos de produção e dificuldades de transporte e armazenamento, também afetam as pesquisas sobre o assunto (ANWAR et al., 2019).

4.3 Tópicos de pesquisa importantes

4.3.1 Análise quantitativa de palavras-chaves frequentes

Uma melhor compreensão do pulso do desenvolvimento da pesquisa, interesses de pesquisa e desafios futuros pode ser obtida pelos pesquisadores por meio da análise de palavras-chave (SUN; WANG; HO, 2012). A Tabela 4 apresenta o ranking e a força total dos links das 24 principais palavras-chave deste estudo. Estas palavras-chave ilustram as questões mais relevantes neste campo de pesquisa nos últimos dez anos. Nesse campo de estudo, destacam-se as palavras-chave, hydrogen production (3009), hydrogen (1801), water (1753), performance (1342), generation (1147), e evolution (1138).

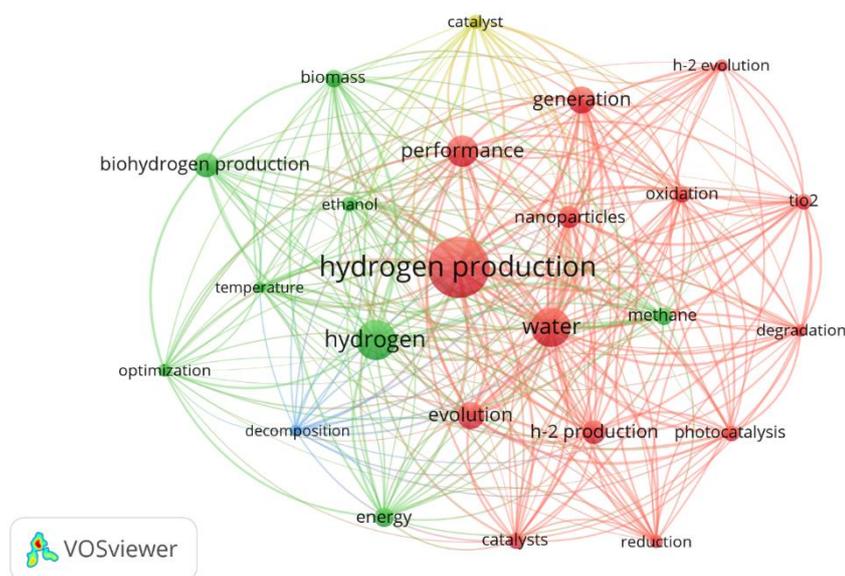
Tabela 4 - Análise quantitativa das 24 palavras-chave usadas com maior frequência na pesquisa de produção de hidrogênio na base de dados WoS.

POSICÃO	PALAVRA-CHAVE	FRE-QUÊNCIA	TLS	POSICÃO	PALAVRA-CHAVE	FRE-QUÊNCIA	TLS
1	Hydrogen production	3009	20354	13	Photocatalysis	614	5143
2	hydrogen	1801	13303	14	Catalysts	593	4596
3	water	1753	13258	15	Oxidation	590	4717
4	performance	1342	10675	16	TiO2	582	4684
5	generation	1147	8889	17	Ethanol	547	4466
6	evolution	1138	8718	18	Catalyst	538	4253
7	biohydrogen production	1012	7650	19	Reduction	500	3998
8	h-2 production	954	7457	20	Optimization	472	3452
9	nanoparticles	899	7337	21	Degradation	462	3734
10	energy	752	5637	22	H-2 evolution	429	3581
11	methane	694	5303	23	Temperature	424	3358
12	biomass	675	5229	24	Decomposition	417	3184

Fonte: O autor (2022).

Um mapa da rede de visualização gerado no programa VOSviewer das 24 palavras-chave mais importantes com pelo menos 400 ocorrências no banco de dados é ilustrado na figura 12.

Figura 12 - Mapeamento da cocitação de palavras-chave na pesquisa de produção de hidrogênio da base de dados WoS.



Fonte: O autor (2022).

O mapa de rede na Figura 12 mostra que a palavra-chave “hydrogen production” é visivelmente a palavra-chave mais usada, ela pertence ao cluster vermelho que contém as palavras-chave "photocatalysis", "performance," and "nanoparticles", indicando que há uma atenção especial dada ao uso de nanopartículas em processos fotocatalíticos e que o problema de desempenho ainda constitui um desafio tecnológico nesta área. Além disso, a Figura 12 também mostra que o cluster verde contém as palavras-chave “hydrogen production”, “biomass”, “Optimization” e “ethanol”, indicando que a investigação da produção de biohidrogênio tem forte atenção, não apenas em novas formas de produção, mas também na otimização dos processos existentes.

4.3.2 Campos de pesquisa

O software CiteSpace, mencionado anteriormente neste trabalho, foi utilizado para analisar e organizar os dados obtidos e entender melhor as tendências emergentes na área. Com este software, é possível visualizar o desenvolvimento do conhecimento sobre uma área de pesquisa específica (WANG et al., 2022). A partir da análise de cluster, é possível identificar dados mais específicos para temas de pesquisas e estudos (WILKS, 2011). As palavras-chave são uma das principais ferramentas que podem ser usadas para determinar caminhos futuros relacionados à produção de hidrogênio verde e suas matérias-primas. A Tabela 5 mostra os cinco conjuntos principais de citação entre artigos relacionados ao tema do estudo.

O Cluster #0 tem “produção fotocatalítica de hidrogênio” como sua principal palavra-chave. Uma atenção especial é dada a esta tecnologia por ser uma das mais promissoras para a conversão de energia solar limpa em energia química, produzindo hidrogênio pela divisão fotocatalítica direta da água em H_2 e O_2 , ou de forma mais eficiente, na presença de reagentes de sacrifício. O artigo que representa o cluster propôs uma nova técnica para construir heterojunções eficientes, para tal, os pesquisadores sintetizaram dois grupos de catalisadores ternários, mostrando pela primeira vez que, alterando a ordem de deposição da platina, é possível obter dois tipos de fotocatalisadores. Os autores analisaram ainda a taxa de produção de hidrogênio fotocatalítico usando os dois tipos de fotocatalisadores (ZHURENOK et al., 2021). Outro artigo deste cluster propõe a fabricação de heteroestruturas ternárias, que proporcionam uma excelente atividade fotocatalítica de luz visível para a evolução de hidrogênio sem a necessidade de qualquer co-catalisador de metal nobre. Os autores acreditam que essas heteroestruturas ternárias sintetizadas podem ser usadas como catalisadores livres de metais nobres promissores para a produção de hidrogênio por separação fotocatalítica de água (CHU et al., 2018). O terceiro artigo do cluster aborda sobre a reciclagem de filme composto de TiO_2 para uso como

fotocatalisador para a produção de hidrogênio, os autores foram capazes de preparar pela primeira vez pelos métodos de corrosão-calcinação e revestimento por rotação solgel. Um dos objetivos dos autores era encontrar rotas fáceis e eficientes para fabricar alguns fotocatalisadores que pudessem ser usados na produção fotocatalítica de hidrogênio em larga escala (ZHANG et al., 2020).

O Cluster #1 é representado pela palavra-chave “produção fermentativa de hidrogênio”. A proeminência desta palavra provavelmente surge porque os processos de fermentação microbiana são usados na maioria dos desenvolvimentos biológicos para produzir hidrogênio. Organismos como archaea, algas e bactérias decompõem a matéria orgânica em dióxido de carbono e hidrogênio (WANG; YIN, 2018). Um dos trabalhos de destaque deste cluster é a investigação do pré-tratamento ácido-térmico de *Chlorella sp.* Os autores mostram a eficácia na solubilização de *Chlorella sp.* usando o pré-tratamento ácido-térmico, sendo as condições ótimas para o pré-tratamento uma concentração de biomassa de 40 g/L, 0,75% (v/v) de H₂SO₄, temperatura de 160 °C e tempo de pré-tratamento de 30 minutos (GIANG et al., 2019).

Em outro artigo, alguns autores utilizaram resíduos de frutas e vegetais e soro de queijo em pó por meio da fermentação escura, que é o processo no qual substratos ricos em carboidratos são metabolizados anaerobicamente para produzir hidrogênio, seguido de fotofermentação, que ocorre em condições anaeróbias também, porém, neste caso, as bactérias fotoheterotróficas usam a luz como fonte de energia e metabolizam moléculas orgânicas para produzir H₂, biomassa e CO₂ como subprodutos primários. Esta estratégia de sistema de dois estágios (fermentação escura e fotofermentação) tem sido apontada como uma proposta para aumentar a eficiência da produção de hidrogênio (NIÑO-NAVARRO et al., 2020). Outra publicação deste cluster trata da utilização de ácidos graxos voláteis provenientes da produção de hidrogênio para serem utilizados como fontes de carbono para o cultivo da levedura oleaginosa *Cryptococcus curvatus*, após experimentos os autores consideram que as matérias-primas deficientes em nitrogênio sejam as melhores matérias-primas para este processo (CHI et al., 2011).

Tabela 5 - Os cinco principais clusters de pesquisa de cocitação sobre matérias-primas para a produção de hidrogênio com base na análise do CiteSpace.

CID	ETIQUETA	NS	RELEVÂNCIA	5 PRINCIPAIS TERMOS	ARTIGOS REPRESENTATIVOS
#0	Photocatalytic hydrogen production	104	2015	photocatalytic hydrogen production; enhanced photocatalytic hydrogen production; hydrogen production; efficient photocatalytic hydrogen production; visible light.	(ANGELINA, ZHURENOK V, 2021) e (JIAYU, CHU, 2018)
#1	Fermentative hydrogen production	66	2014	fermentative hydrogen production; photo fermentation process; initial feedstock composition dilution; sequential dark; microbial population.	(TRAN, T GIANG, 2019) e (C, NINO-NAVARRO, 2020)
#2	Process design	63	2016	process design; process intensification; pemfc grade hydrogen production; multifunctional reactor; biomass gasification.	(BO, LIAO, 2013) e (PO-CHIH, KUO, 2018)
#3	continuous photo-hydrogen production;	59	2013	continuous photo-hydrogen production; macro-algae laminaria japônica; using anaerobic mixed bactéria; conversion efficiency; material flow analysis.	(HONGYAN, LIU, 2014) e (ELA, EROGLU, 2011)
#4	Looping steam	54	2014	looping steam; using sorption; enhanced steam; thermodynamic analysis; shale gas.	(ZAINAB, IBRAHIM SG ADIYA, 2017) e (J, SPRAGG, 2018)

Fonte: O autor (2022).

4.3.3 Tendências emergentes

Cluster #2 apresenta o método de produção de fotoridrogênio por cultura contínua a partir de diferentes matérias-primas. Um dos artigos de destaque estuda a eficiência da sacarina da macroalga *Laminaria japonica* pré-tratada para a produção de hidrogênio. Neste estudo, o pré-tratamento térmico se mostrou o mais promissor, com os melhores resultados para aumentar a produção de hidrogênio. Além desse pré-tratamento, os autores realizaram outros diferentes pré-tratamentos, como ácido, alcalino e ultrassônico, e fizeram uma comparação entre eles (LIU; WANG, 2014). Um outro estudo (EROGLU et al., 2011) pesquisou a produção de hidrogênio fotofermentativo a partir de águas residuais de moinhos, analisando a influência do ferro e do molibdênio. Os autores verificaram que a adição de metal às águas residuais do

moinho de azeitona pode proporcionar um aumento na produção de hidrogênio, acúmulo de biomassa e remoção de demandas químicas de oxigênio. O terceiro artigo deste cluster (REN et al., 2014) apresenta a modificação de fibras de carvão ativadas por soluções ácidas, alcalinas e neutras como uma proposta para melhorar a capacidade de imobilização de bactérias e o desempenho da produção de hidrogênio.

O Cluster # 3 concentra-se em publicações que apresentam métodos de produção de hidrogênio com integração de loop químico. O documento promissor deste cluster faz uma análise minuciosa do equilíbrio químico com o objetivo de ilustrar as vantagens da integração do loop químico e do aprimoramento da sorção com o método convencional de reforma a vapor catalítica para a produção de hidrogênio. No artigo, os autores usam gás de xisto típico como matéria-prima e analisam o efeito da temperatura, proporção de vapor para carbono e pressão (S G ADIYA; DUPONT; MAHMUD, 2017). O segundo artigo deste cluster faz uma análise termodinâmica da reforma a vapor de looping químico aprimorada por sorção para produção de hidrogênio usando bio-óleo como matéria-prima. No artigo, os autores destacam o papel do aprimoramento da sorção, que pode aumentar o rendimento e a pureza do hidrogênio, e do loop químico, que pode reduzir o balanço de energia líquida do processo, mas, os melhores resultados são obtidos quando essas duas técnicas são combinadas. (SPRAGG; MAHMUD; DUPONT, 2018). No terceiro artigo deste cluster, carvão, lodo de esgoto, microalgas e serragem são utilizados como matérias-primas para realizar uma análise termodinâmica da produção de hidrogênio via gaseificação de água supercrítica. Os autores analisam os efeitos de vários parâmetros, como temperatura, pressão e concentração de alimentação (YANG et al., 2021).

O Cluster #4 enfatiza a gaseificação de água supercrítica para a produção de hidrogênio. Em um dos estudos, biomassas lignocelulósicas (madeira de pinho e palha de trigo) foram impregnadas com níquel para gaseificação subcrítica (300 °C) e supercrítica (400 e 500 °C) da água, com o objetivo de analisar a influência da temperatura, razão biomassa-água e tempo de residência na produção de hidrogênio. Os autores do estudo verificaram que a produção de hidrogênio teve um rendimento maior em temperaturas supercríticas mais altas (NANDA et al., 2016). Uma outra publicação (LIAO et al., 2013) aborda sobre o desenvolvimento de um novo receptor/reator para produção de hidrogênio com gaseificação de biomassa em água supercrítica. Os autores usaram espiga de milho como matéria-prima e conseguiram gerar gás combustível rico em hidrogênio no dispositivo construído. Os autores também analisaram o efeito da irradiação solar direta normal, taxas de fluxo, concentração de matérias-primas e catalisadores alcalinos. Um estudo sobre o uso de alguns resíduos agrícolas para produção de hidrogênio por gaseificação catalítica subcrítica e supercrítica de água também faz parte desse cluster

(MADENOGLU et al., 2012). Neste estudo, os autores utilizaram algodão e talos de tabaco como matérias-primas. Efeitos da temperatura (300-600 °C) e tipo de catalisador (Troa , dolomita e Bórax) também foram analisados.

5 CONCLUSÃO

Neste artigo, foi realizada uma ampla análise da literatura relacionada à produção de hidrogênio, além das tendências emergentes que são analisadas nos trabalhos atuais e das 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 diferentes ferramentas (VoSviewer , CiteSpace e Microsoft Excel). A partir dessa base de dados inicial, foi possível criar mais duas bases de dados direcionadas de 3.530 e 529 artigos, respectivamente, com o objetivo de compreender a direção da pesquisa nessa área. Este trabalho pode ser usado por pesquisadores interessados na produção de hidrogênio, fornecendo direções de pesquisas importantes. O estudo realizado envolve as seguintes conclusões relevantes:

- A China, EUA e a 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, ela recebeu pouca atenção na literatura devido ao número de artigos que a mencionam ser muito reduzida, apesar do enorme potencial e das vantagens de sustentabilidade que apresenta. Isso se deve ao facto de ser uma área de pesquisa recente e normalmente matérias exploradas a mais tempo tornam-se mais interessantes devido à quantidade de informações disponíveis.
- Os tópicos de pesquisa foram identificados a partir da perspectiva de palavras-chave. Da análise de todas elas, destacam-se os seguintes temas: produção de hidrogênio, hidrogênio, água, desempenho, geração, evolução e biohidrogênio.
- A Chinese Academy Of Science é a organização que se encontra no centro das 4.089 organizações envolvidas na pesquisa sobre a produção de hidrogênio, tendo produzido o maior número de publicações, seguida pela Xi An Jiaotong University.
- Conforme ilustrado pela análise de cluster, dois campos de pesquisa constantes são a produção fotocatalítica de hidrogênio e a produção fermentativa de hidrogênio. No futuro, os estudos devem se concentrar em Projeto de processo, produção contínua de foto-hidrogênio e vapor em loop.

Apesar do grande número de matérias-primas e métodos de produção conhecidos, ainda existe uma grande preocupação por parte dos pesquisadores quanto ao baixo rendimento de hidrogênio que algumas matérias-primas apresentam, a eficiência durante os processos de

produção de hidrogênio, o aprimoramento dos métodos existentes, e principalmente a dificuldade de utilização de algumas matérias-primas, métodos ou processos na produção de hidrogênio em grande escala.

REFERÊNCIAS

- ANGERIZ-CAMPOY, R.; ÁLVAREZ-GALLEGO, C. J.; ROMERO-GARCÍA, L. I. Thermophilic anaerobic co-digestion of organic fraction of municipal solid waste (OFMSW) with food waste (FW): Enhancement of bio-hydrogen production. **Bioresource Technology**, v. 194, 2015.
- ANPO, M. et al. The preparation and characterization of highly efficient titanium oxide-based photofunctional materials. **Annual Review of Materials Research**, v. 35, 2005.
- ANWAR, M. et al. **Recent advancement and strategy on bio-hydrogen production from photosynthetic microalgae. Bioresource Technology**, 2019.
- ANWAR, S. et al. Recent development in electrocatalysts for hydrogen production through water electrolysis. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 46, n. 63, 2021.
- AWALEH, M. O. et al. Economic feasibility of green hydrogen production by water electrolysis using wind and geothermal energy resources in asal-ghoubbet rift (Republic of Djibouti): A comparative evaluation. **Energies**, v. 15, n. 1, 2022.
- AYAS, N.; ESEN, T. Hydrogen production from tea waste. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 41, n. 19, 2016.
- AYODELE, T. R.; MUNDA, J. L. Potential and economic viability of green hydrogen production by water electrolysis using wind energy resources in South Africa. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 44, n. 33, 2019.
- AZIZ, M.; ODA, T.; KASHIWAGI, T. Advanced energy harvesting from macroalgae-innovative integration of drying, gasification and combined cycle. **Energies**, v. 7, n. 12, 2014.
- BEHROOZSARAND, A.; ZAMANIYAN, A.; EBRAHIMI, H. Industrial hydrogen production and CO₂ management. **Journal of Natural Gas Science and Engineering**, v. 2, n. 4, 2010.
- BURTON, N. A. et al. **Increasing the efficiency of hydrogen production from solar powered water electrolysis. Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 2021.
- CHANG, A. C. C. et al. **Biomass gasification for hydrogen production. International Journal of Hydrogen Energy. Anais...**2011.
- CHEN, C. CiteSpace II: Detecting and visualizing emerging trends and transient patterns in scientific literature. **Journal of the American Society for Information Science and Technology**, v. 57, n. 3, 2006.
- CHEN, C. et al. Sustainability and challenges in biodiesel production from waste cooking oil: An advanced bibliometric analysis. **Energy Reports**, v. 7, 2021.
- CHENNOUF, N. et al. **Experimental study of solar hydrogen production performance by water electrolysis in the south of Algeria. Energy Procedia. Anais...**2012.
- CHI, J.; YU, H. **Water electrolysis based on renewable energy for hydrogen production. Cuihua Xuebao/Chinese Journal of Catalysis**, 2018.

CHI, Z. et al. Oleaginous yeast *Cryptococcus curvatus* culture with dark fermentation hydrogen production effluent as feedstock for microbial lipid production. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 36, n. 16, 2011.

CHU, J. et al. Highly Efficient Visible-Light-Driven Photocatalytic Hydrogen Production on CdS/Cu₇S₄/g-C₃N₄ Ternary Heterostructures. **ACS Applied Materials and Interfaces**, v. 10, n. 24, 2018.

DE FÁTIMA PALHARES, D. D. A.; 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, 2018.

DELL, R. M. **Report on the second world hydrogen energy conference**. International Journal of Hydrogen Energy. **Anais...**1979.

DINCER, I. **Green methods for hydrogen production**. International Journal of Hydrogen Energy. **Anais...**2012.

DINCER, I.; ACAR, C. Review and evaluation of hydrogen production methods for better sustainability. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 40, n. 34, 2014.

EROGLU, E. et al. Effect of iron and molybdenum addition on photofermentative hydrogen production from olive mill wastewater. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 36, n. 10, 2011.

EROGLU, E.; MELIS, A. Photobiological hydrogen production: Recent advances and state of the art. **Bioresource Technology**, v. 102, n. 18, 2011.

GIANG, T. T. et al. Improvement of hydrogen production from *Chlorella* sp. biomass by acid-thermal pretreatment. **PeerJ**, v. 2019, n. 3, 2019.

HIBINO, T. et al. Direct electrolysis of waste newspaper for sustainable hydrogen production: an oxygen-functionalized porous carbon anode. **Applied Catalysis B: Environmental**, v. 231, 2018.

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.

HURTUBIA, B.; SAUMA, E. Economic and environmental analysis of hydrogen production when complementing renewable energy generation with grid electricity. **Applied Energy**, v. 304, 2021.

IPATIEFF, V. N.; MONROE, G. S.; FISCHER, L. E. Low Temperature Hydrogen Production. **Industrial & Engineering Chemistry**, v. 42, n. 1, 1950.

JO, J. H. et al. Application of kernel partial least square to predict biological hydrogen production by enterobacter aerogenes. **Journal of Nanoelectronics and Optoelectronics**, v. 5, n. 2, 2010.

KAIWEN, L.; BIN, Y.; TAO, Z. **Economic analysis of hydrogen production from steam reforming process: A literature review.** *Energy Sources, Part B: Economics, Planning and Policy*, 2018.

LIAO, B. et al. **Solar receiver/reactor for hydrogen production with biomass gasification in supercritical water.** *International Journal of Hydrogen Energy. Anais...*2013.

LIN, M. Y.; HOURNG, L. W.; HSU, J. S. The effects of magnetic field on the hydrogen production by multielectrode water electrolysis. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects*, v. 39, n. 3, 2017.

LIN, M. Y.; HOURNG, L. W.; KUO, C. W. The effect of magnetic force on hydrogen production efficiency in water electrolysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 37, n. 2, 2012.

LIN, M. Y.; HOURNG, L. W.; WU, C. H. The effectiveness of a magnetic field in increasing hydrogen production by water electrolysis. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects*, v. 39, n. 2, 2017.

LIU, H.; WANG, G. Fermentative hydrogen production from macro-algae *Laminaria japonica* using anaerobic mixed bacteria. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 39, n. 17, 2014.

LOPEZ-HIDALGO, A. M.; SMOLIŃSKI, A.; SANCHEZ, A. **A meta-analysis of research trends on hydrogen production via dark fermentation.** *International Journal of Hydrogen Energy*, 2022.

LU, Y. J. et al. Hydrogen production by biomass gasification in supercritical water: A parametric study. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 31, n. 7, 2006.

MADENOGLU, T. G. et al. Hydrogen production from some agricultural residues by catalytic subcritical and supercritical water gasification. *Journal of Supercritical Fluids*, v. 67, 2012.

NANDA, S. et al. Subcritical and supercritical water gasification of lignocellulosic biomass impregnated with nickel nanocatalyst for hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 41, n. 9, 2016.

NIÑO-NAVARRO, C. et al. Enhanced hydrogen production by a sequential dark and photo fermentation process: Effects of initial feedstock composition, dilution and microbial population. *Renewable Energy*, v. 147, 2020.

PURNAMI et al. Strengthening external magnetic fields with activated carbon graphene for increasing hydrogen production in water electrolysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 45, n. 38, 2020.

PUTRA, A. E. E. et al. Plasma generation for hydrogen production from banana waste. *Bio-mass Conversion and Biorefinery*, v. 12, n. 2, 2022.

RAN, J. et al. Ti₃C₂ MXene co-catalyst on metal sulfide photo-absorbers for enhanced visible-light photocatalytic hydrogen production. *Nature Communications*, v. 8, 2017.

REN, H. Y. et al. Carrier modification and its application in continuous photo-hydrogen production using anaerobic fluidized bed photo-reactor. **GCB Bioenergy**, v. 6, n. 5, 2014.

ROSA, L.; MAZZOTTI, M. Potential for hydrogen production from sustainable biomass with carbon capture and storage. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 157, 2022.

S G ADIYA, Z. I.; DUPONT, V.; MAHMUD, T. Chemical equilibrium analysis of hydrogen production from shale gas using sorption enhanced chemical looping steam reforming. **Fuel Processing Technology**, v. 159, 2017.

SANTOS, D. M. F.; SEQUEIRA, C. A. C.; FIGUEIREDO, J. L. Hydrogen production by alkaline water electrolysis. **Quimica Nova**, v. 36, n. 8, 2013.

SEO, H.-W.; KIM, J.-S. Hydrogen Production by Photoelectrochemical Water Splitting. **Applied Science and Convergence Technology**, v. 27, n. 4, 2018.

SETIANI, P. et al. Mechanisms and kinetic model of hydrogen production in the hydrothermal treatment of waste aluminum. **Materials for Renewable and Sustainable Energy**, v. 7, n. 2, 2018.

SPRAGG, J.; MAHMUD, T.; DUPONT, V. Hydrogen production from bio-oil: A thermodynamic analysis of sorption-enhanced chemical looping steam reforming. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 43, n. 49, 2018.

SUN, J.; WANG, M. H.; HO, Y. S. A historical review and bibliometric analysis of research on estuary pollution. **Marine Pollution Bulletin**, v. 64, n. 1, p. 13–21, jan. 2012.

TENTU, R. D.; BASU, S. **Photocatalytic water splitting for hydrogen production. Current Opinion in Electrochemistry**, 2017.

VAN ECK, N. J.; WALTMAN, L. Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping. **Scientometrics**, v. 84, n. 2, 2010.

WANG, D. et al. Free ammonia enhances dark fermentative hydrogen production from waste activated sludge. **Water Research**, v. 133, 2018.

WANG, H. et al. **A bibliometric review on stability and reinforcement of special soil sub-grade based on CiteSpace. Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)**, 2022.

WANG, J.; YIN, Y. **Fermentative hydrogen production using pretreated microalgal biomass as feedstock. Microbial Cell Factories**, 2018.

WU, C.; WILLIAMS, P. T. Pyrolysis-gasification of post-consumer municipal solid plastic waste for hydrogen production. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 35, n. 3, 2010.

YANG, C. et al. Thermodynamic analysis of hydrogen production via supercritical water gasification of coal, sewage sludge, microalga, and sawdust. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 46, n. 34, 2021.

ZENG, K.; ZHANG, D. **Recent progress in alkaline water electrolysis for hydrogen production and applications**. **Progress in Energy and Combustion Science**, 2010.

ZHANG, M. et al. Fixed Z-scheme TiO₂|Ti|WO₃ composite film as recyclable and reusable photocatalyst for highly effective hydrogen production. **Optical Materials**, v. 99, 2020.

ZHAO, N. et al. **Bibliometric and content analysis on emerging technologies of hydrogen production using microbial electrolysis cells**. **International Journal of Hydrogen Energy**, 2020.

ZHURENOK, A. V. et al. Constructing g-C₃N₄/Cd_{1-x}Zn_xS-based heterostructures for efficient hydrogen production under visible light. **Catalysts**, v. 11, n. 11, 2021.

ZUO, F. et al. Self-doped Ti³⁺ enhanced photocatalyst for hydrogen production under visible light. **Journal of the American Chemical Society**, v. 132, n. 34, 2010.