



**UNIVERSIDADE DA INTEGRAÇÃO INTERNACIONAL DA LUSOFONIA
AFRO - BRASILEIRA**

INSTITUTO DE ENGENHARIAS E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

BACHARELADO EM ENGENHARIA DE ENERGIAS

NONTCHENATCH FERREIRA CARIBE

**ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA AVANÇADA DA EVOLUÇÃO CIENTÍFICA SOBRE
ARMAZENAMENTO DE HIDROGÊNIO**

REDENÇÃO - CE

2023

NONTCHENATCH FERREIRA CARIBE

**ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA AVANÇADA DA EVOLUÇÃO CIENTÍFICA
SOBRE ARMAZENAMENTO DE HIDROGÊNIO**

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.

Caribe, Nontchenatch Ferreira. C275a

Uma análise bibliométrica avançada da evolução científica sobre armazenamento de hidrogênio / Nontchenatch Ferreira Caribe. - Redenção, 2023.
52f: 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. Dr. José Cleiton Sousa dos Santos.

1. Hidrogênio - Armazenamento. 2. Bibliometria. I. Título CE/UF/BSP

CDD 661.8

NONTCHENATCH FERREIRA CARIBE

ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA AVANÇADA DA EVOLUÇÃO CIENTÍFICA SOBRE
ARMAZENAMENTO DE HIDROGÊNIA

Monografia apresentada ao Instituto de Engenharia 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: 06 / 07 / 2023

BANCA EXAMINADORA



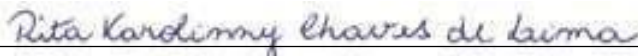
Prof. Dr. José Cleiton Sousa dos Santos

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



Me. FRANCISCO SIMÃO NETO

Universidade Federal do Ceará (UFC)



PROF^a. DR^a. RITA KAROLINNY CHAVES DE LIMA

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

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 Sigelma Janice Ferreira Ture Forbs, por todo apoio emocional e financeiro, por orarem e torcerem por mim mesmo à distância.

Aos meus amigos, por estarem sempre disponíveis 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.

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

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

O armazenamento de hidrogênio pode-se dar de diferentes formas, tendo em conta o estado em que se encontra. De uns anos para cá, tem-se visto um crescente interesse no estudo da produção, transporte e armazenamento. Ao falarmos de armazenamento de hidrogênio pode-se ver que atualmente existem diferentes formas de o fazer, como por exemplo na forma sólida com o método de ligação química do hidrogênio com hidretos metálicos, na forma gasosa usando o método de compressão e na forma líquida com o processo de liquefação. Nessa análise bibliométrica deu-se ênfase em mostrar de forma ilustrada e geral a pesquisa do armazenamento de hidrogênio, mostrando o estado em que a pesquisa se encontra, isso pode ser de muita valia para os pesquisadores e profissionais da área. Os dados para essa análise foram obtidos através da lista de bases da Web of Science nos periódicos capes. Fazendo a pesquisa baseando principalmente no tema, encontramos 10.359 artigos, adicionando a palavra-chave “métodos” esse número cai para 567 artigos, fazendo alguns refinamentos pertinentes como o caso das delimitações dos anos de publicação de 2010 a 2023 e tipos de documentos, acabamos por ter um número total de artigos de 550. Após refinamento e usando Vosviewer, Citespace e Microsoft Excel, viu-se que o país com mais publicações nesse tema é a China com 35% de publicações, logo em seguida temos USA com 9,27% de publicações e após ele a Índia com 6,18%. As organizações que possuem mais publicações nessa área são, a Inner mongolia university of science technology, após ele vem a Central iron steel research institute. O que se trata dos jornais com mais publicações temos, international journal of hydrogen energy, na sequência aparece o Journal of alloys and compounds, também foram analisados os autores mais influentes na pesquisa do armazenamento de hidrogênio.

Palavras-Chave: Hidrogênio. Métodos de armazenamento. Análise bibliométrica.

ABSTRACT

Hydrogen storage can take place in different ways, considering the state it is in, for some years now, there has been a growing interest in the study of production, transport, and storage. When we talk about hydrogen storage, there are currently ways to make them, such as in the form of hydrides, gaseous hydrogen storage, and liquid hydrogen storage. In this bibliometric analysis, emphasis was placed on showing in an illustrated and general way the research on hydrogen storage, showing the current state in which, the research is found, which can be of great value for researchers and professionals in the area. The data for this analysis were obtained through the list of the Web of Science databases in Capes journals, doing the research based mainly on the theme, we found 10,359 articles, adding the keyword "methods" this number drops to 567 articles, making some refinements pertinent as the case of delimitations of years 2010 to 2023 and types of documents, we ended up having a total number of articles of 550. After refinement and using Vosviewer and Citespace, Microsoft Excel, it was seen that the country with more publications on this theme is China with 35% of publications, followed by the USA with 9.27% of publications, followed by India with 6.18%. The organizations that have more publications in this area are the Inner Mongolia University of Science Technology, followed by the Central Iron Steel Research Institute. As for the journals with the most publications, we have the International Journal of Hydrogen Energy, followed by the Journal of Alloys and Compounds. The most influential authors in hydrogen storage research were also analyzed.

Keywords: Hydrogen. Storage methods. Bibliometric analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Estrutura representativa dos critérios utilizados da pesquisa	17
Figura 2: Número Publicação anual sobre armazenamento de hidrogênio de 2010 a 2023.....	19
Figura 3: Número Publicação anual sobre métodos de armazenamento de hidrogênio de 2010 a 2023.....	19
Figura 4: Os principais periódicos que foram publicados entre os anos de 2010 a 2023 na área de armazenamento de hidrogênio.....	25
Figura 5: Países, autores e instituições que publicaram nos anos de 2010-2023 em armazenamento de hidrogênio.....	26
Figura 6: Gráfico dos três campos, países, autores e instituições.....	30
Figura 7: Distribuição das áreas de pesquisa de artigos sobre armazenamento de hidrogênio.....	34
Figura 8: Matéria-prima para armazenar hidrogênio em diferentes	35
Figura 9: Base física do armazenamento de hidrogênio	36
Figura 10: Matérias-primas para o armazenamento de hidrogênio	36
Figura 11: Métodos utilizados no armazenamento de hidrogênio.....	38
Figura 12: Mapeamento de citações de palavras-chave em artigos no Web of Science sobre armazenamento de hidrogênio.....	40
Figura 13: Mapa temático para a pesquisa sobre armazenamento de hidrogênio	43
Figura 14: Perspectivas emergentes do hidrogênio, sua produção, armazenamento e transporte.....	45
Figura 15: Mostra algumas vantagens e desvantagens relacionados ao armazenamento de hidrogênio.....	47
Figura 16: apresenta dados relevantes, mostrando o crescimento anual no volume das patentes.....	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Mostra os países com maior número de citações	21
Tabela 2: Mostra as instituições com maior número de citações.....	22
Tabela 3: Mostra os Jornais com maior número de citações.....	23
Tabela 4: Mostra os autores com maior número de citações.....	24
Tabela 5: Artigos mais citados dos últimos 13 anos sobre armazenamento de hidrogênio.....	38
Tabela 6: Classificação das palavras-chave mais cruciais nos artigos analisados.....	40

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AC	Média de citações
NP	Número de publicações
NC	Número de Citações
TLS	Força Total do Link
WoS	Web of Science
USA	Estados unidos de América

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	12
2. OBJETIVOS E JUSTIFICATIVA.....	13
2.1 Objetivo geral.....	13
2.2 Objetivos específicos.....	13
2.3 Justificativa.....	14
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	14
3.1 Bibliometria.....	14
3.2 Aplicações e classificações do hidrogênio.....	15
3.3 Armazenamento de hidrogênio.....	16
3.4 Clusterização.....	16
4. METODOLOGIA.....	17
4.1 Coleta de dados.....	17
4.2 Análise de dados.....	18
5. RESULTADOS.....	18
5.1 Indicadores de desempenho.....	18
5.1.1 Resultados de publicações.....	18
5.1.2 Distribuição de revistas científicas, países, autores e instituições.....	20
5.1.3 Pontos de acesso de pesquisa.....	30
5.1.4 Os artigos mais citados.....	30
5.1.5 Tema de pesquisa de fundo.....	33
5.1.6 Tópicos de pesquisa.....	33
5.2 Classificação por tópico de pesquisa.....	34
5.3 Como é armazenado o hidrogênio.....	35
5.3.1 Magnésio.....	37
5.3.2 Áreas temáticas da pesquisa atual.....	39
5.3.3 Análise quantitativa das palavra-chave mais frequentes.....	39
5.4 Mapa temático.....	42
5.4.1 Implicações para a pesquisa: Perspectivas e oportunidades futuras.....	43
5.4.2 Aspectos económicos e viabilidade técnica.....	44
5.4.3 Oportunidades e aplicações futuras de matérias prima de armazenamento de hidrogênio.....	44
5.4.4 Limitações de pesquisa.....	46
5.5 Patentes com métodos de armazenamento de hidrogênio.....	47
6. CONCLUSÃO.....	49
REFERÊNCIAS.....	50

1. INTRODUÇÃO

O hidrogênio é o elemento em maior abundância na crosta terrestre, representando 75% da massa total do planeta terra. 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 petróleos) e na produção de produtos químicos (amônia, metanol e produtos farmacêuticos). A quantidade de substâncias dispostas na natureza que contêm hidrogênio é vasta, destacando-se na água. Além dela, o hidrogênio pode ser obtido de hidrocarbonetos fosseis, sulfeto de hidrogênio, biomassa e outras substâncias citadas acima podem ser divididas em quatro grupos: elétrica, térmica, bioquímica e fotônica (DINCER, 2012).

O primeiro gerador de H₂ foi construído em 1794, nos arredores de Paris, com o intuito de ser utilizado em balões de reconhecimento. A primeira produção de H₂ por eletrólise da água ocorreu em 1800 por Nicholson e Carlisle e sua liquefação foi obtida por James Dewar em 1889 (DAWOOD; ANDA; SHAFIULLAH, 2020). Alguns anos antes, Robert Grove construiu a primeira célula a combustível, precursora daquelas que serão neste século XXI o principal dispositivo de reconversão do H₂ em energia elétrica. O emprego do H₂ em balões foi concebido por Ferdinand von Zeppelin em 1900 e largamente utilizado entre 1920 e 1930.

Após a sua produção, surgem também a preocupação sobre o seu armazenamento e transporte, para o armazenamento, levam-se em conta os fatores como a densidade energética e custo-benefício. Existem formas de armazenar hidrogênio, na forma gasosa, líquida e em hidretos metálicos estado (sólido). Segundo Wen et al. (2021), o armazenamento de hidrogênio é uma etapa crítica para a viabilidade do uso generalizado dessa fonte energética. Diversos métodos têm sido explorados para alcançar essa meta, como o armazenamento físico em forma de alta pressão, criogenia ou adsorção, e o armazenamento químico em forma de hidretos metálicos ou materiais de carbono.

A maneira mais comum de armazenar hidrogênio é na sua forma gasosa após a compressão, até então, não se tem um método totalmente favorável e benéfico para armazenar hidrogênio, o método mais utilizado atualmente é através de hidretos metálicos. Existem métodos alternativos para armazenar hidrogênio tendo em conta a dificuldade do seu armazenamento no estado

líquido, uma das alternativas é a liquefação (condensação), esse processo aumenta muitas vezes a sua densidade. Os estudos e pesquisas nessa área tem um crescimento praticamente linear no decorrer dos anos, com 27 publicações em 2010 e 35 em 2023 como mostra a (figura 1), contando que o ano 2023 conta até o mês de junho.

Para que possamos compreender o desenvolvimento da pesquisa sobre armazenamento de hidrogênio, fez-se uma análise bibliométrica avançada que nada mais é que uma técnica de análise de pesquisa que estuda publicações em livros, relatórios e artigos (FERREIRA, 2011) para quantificar, analisar e avaliar a produção acadêmica científica de temas (RAMOS-RODRÍGUEZ; RUÍZ-NAVARRO, 2004). Essa abordagem é adequada ao objetivo geral desse estudo. Observando os principais indicadores de desempenho como por exemplo, países que mais falam do tema, autores, jornais, revistas que mais publicam sobre palavras-chave mais presentes a partir do banco de dados da Web of Science, adicionando clusters por análises de tema e num período de 2010 a 2023 que obteve 567 publicações que, ao passar pelo processo de refino, passou a ser 550 publicações.

2. OBJETIVOS E JUSTIFICATIVA

2.1 Objetivo geral

- Analisar, por meio de uma pesquisa bibliométrica, a produção científica referente à temática, a evolução do armazenamento de hidrogênio entre janeiro 2010 a junho de 2023.

2.2 Objetivos específicos

- Investigar a colaboração científica e a produção de pesquisas relacionadas ao armazenamento de hidrogênio;
- Analisar de forma abrangente a literatura científica sobre os diferentes métodos de armazenamento de hidrogênio, identificando as principais abordagens e tendências;
- Compreender a evolução histórica e as perspectivas futuras da pesquisa no campo do armazenamento de hidrogênio;

2.3 Justificativa

- Oferecer direcionamentos relevantes para pesquisadores e profissionais interessados no armazenamento de hidrogênio, destacando áreas de pesquisa promissoras, tecnologias emergentes e desafios a serem enfrentados.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Bibliometria

Uma análise bibliométrica, consiste em um método de análise estatística para avaliar resultados de pesquisas, importância e influência de autores, institutos, periódicos, entre outros, dentro de um determinado campo (GENG et al., 2017).

Para Wolfram (2017) a bibliometria como metodologia iniciou-se com a finalidade de avaliar e entender o desempenho das atividades de produção científica acadêmica, utilizando para tanto uma quantidade de dados, referentes ao período pesquisado, para a extração das informações necessárias. Destaca-se ainda a utilização métodos estatísticos e matemáticos que tornam o processo avaliativo da produtividade científica mais objetivo

Dois métodos bibliométricos de amplo uso são a análise de citações e a análise de conteúdo. A análise de citações implica uma relação entre citações e trabalhos citados em uma área de pesquisa específica e permite identificar literaturas centrais, periódicos, países, etc. Já a análise de conteúdo visa identificar pontos críticos atuais com base na frequência de palavras-chave do autor e outras distribuições. Em geral, a análise bibliométrica oferece uma ferramenta útil para passar do nível micro, dito cientistas/institutos para o nível macro nacional/global. Além disso, as tendências de pesquisa e questões populares nos campos de estudo podem ser identificadas pelo emprego de tal método (GAO et al., 2016).

A bibliometria pode também ser utilizada para auxiliar outros métodos de prospecção, como o de cenários, que tem como objetivo estudar os possíveis contextos futuros. O método de cenários não busca encontrar um acerto sobre previsões do que virá a ser o futuro, mas principalmente agregar mais informações, melhorar as informações e assim compreender as decisões envolvidas para que elas sejam tomadas observando-se o que tenha sido prospectado para se atingir objetivos relacionados ao futuro (WRIGHT & SPERS, 2006).

A identificação do número de vezes em que termos são encontrados indicaria o nível de atividade de pesquisa sobre o tema (Vidican, Woon & Madnick, 2009; Porter, A., 2007). Uma análise contendo o conteúdo integral das publicações pode resultar na quantidade de vezes em que os termos aparecem nos respectivos documentos. O que é realizado no presente estudo é a contagem de publicações que contém os termos, uma abordagem mais simplificada. As análises propostas serão baseadas na produção do hidrogénio verde, com ênfase para o produzido foto sinteticamente.

3.2 Aplicações e classificações do hidrogênio

O hidrogénio é uma matéria-prima de extrema importância usada em indústrias como na síntese de amônia para fertilizantes, redução metalúrgica para refino de aço e no processamento de petróleo bruto. Hoje no mundo cerca de 70 mega toneladas de H_2 por ano são usados em forma pura, enquanto outros 45 mega toneladas de H_2 são usados na indústria sem purificação prévia de outros gases (MILLER et al., 2020). O hidrogênio configura como uma importante alternativa, ao aumento do aquecimento global, devido ao facto de ser um combustível que em sua queima libera praticamente zero dióxido de carbono. No entanto o seu processo de produção é que poderá ser um poluidor do ambiente. Projeta-se que o mercado global de hidrogênio cresça de 70 milhões de toneladas em 2019 para 120 milhões de toneladas em 2024 (ATILHAN et al., 2021). O hidrogênio pode ser classificado em cinza, azul e verde. O Cinza refere-se ao hidrogênio produzido a partir da reforma de combustíveis fósseis. O azul refere-se a processos envolvendo combustíveis fósseis, porém, há também captura do dióxido de carbono liberado no processo. O verde é produzido por processos que são renováveis e que usam matéria prima renovável (ATILHAN et al., 2021).

O hidrogênio pode ser classificado em cinza, azul e verde. O Cinza refere-se ao hidrogênio produzido a partir da reforma de combustíveis fósseis. O azul refere-se a processos envolvendo combustíveis fósseis, porém, há também captura do dióxido de carbono liberado no processo. O verde é produzido por processos que são renováveis e que usam matéria prima renovável (ATILHAN et al., 2021). O hidrogénio verde é produzido através de várias fontes de energias renováveis, tais como, eólica, solar, nuclear, hidrelétrica, geotérmica e biomassa. Em que na maioria desses processos há a separação da água (H_2O) para obtenção do H_2 verde (LI, 2017). Pelo facto da maioria dos processos acontecerem através da separação da H_2O , processos como eletrolise, termólise, separação fotocatalítica e separação termoquímica da água, são

comumente usadas. Além de desidrogenação de moléculas portadoras de hidrogênio.

3.3. Armazenamento de hidrogênio

O armazenamento de hidrogênio é um dos principais desafios para o desenvolvimento de uma economia baseada nesse combustível limpo e renovável. O hidrogênio tem uma alta densidade energética por massa, mas uma baixa densidade energética por volume, o que significa que ele ocupa muito espaço quando armazenado em seu estado gasoso. Por isso, diversas técnicas têm sido pesquisadas para reduzir o volume do hidrogênio e aumentar sua eficiência de armazenamento, tais como a compressão, a liquefação, a adsorção em materiais porosos e a hidretação de metais (ZÜTTEL, A et.al, 2010).

3.4. Clusterização

A clusterização é outra técnica de enriquecimento da análise bibliométrica cujo objetivo principal é a criação de clusters temáticos ou sociais (dependendo do tipo de análise que está sendo realizada) (DONTU et al., 2021), uma vez que a análise de cluster visa a detecção de particionamento natural de objetos, em outras palavras, agrupa observações semelhantes em subconjuntos homogêneos (BOCCARD; RUDAZ, 2013).

Cada uma dessas técnicas apresenta vantagens e desvantagens em termos de custo, segurança, durabilidade e desempenho. A compressão e a liquefação requerem altas pressões e baixas temperaturas, respectivamente, o que implica em um alto consumo de energia e riscos de vazamento. A adsorção em materiais porosos depende da disponibilidade e da qualidade desses materiais, que podem ter uma capacidade limitada de armazenar hidrogênio. A hidretação de metais consiste na formação de compostos estáveis entre o hidrogênio e alguns metais, como o ferro, o níquel e o magnésio, que podem liberar o hidrogênio quando aquecidos. Essa técnica tem a vantagem de permitir um armazenamento compacto e seguro do hidrogênio, mas também tem o inconveniente de exigir altas temperaturas para a liberação do hidrogênio e de causar uma perda de capacidade ao longo dos ciclos de carga e descarga. Portanto, o armazenamento de hidrogênio ainda é um tema de grande interesse científico e tecnológico, que requer mais estudos e inovações para tornar o uso do hidrogênio mais viável e sustentável (SCHLAPBACH L et.al, 2001).

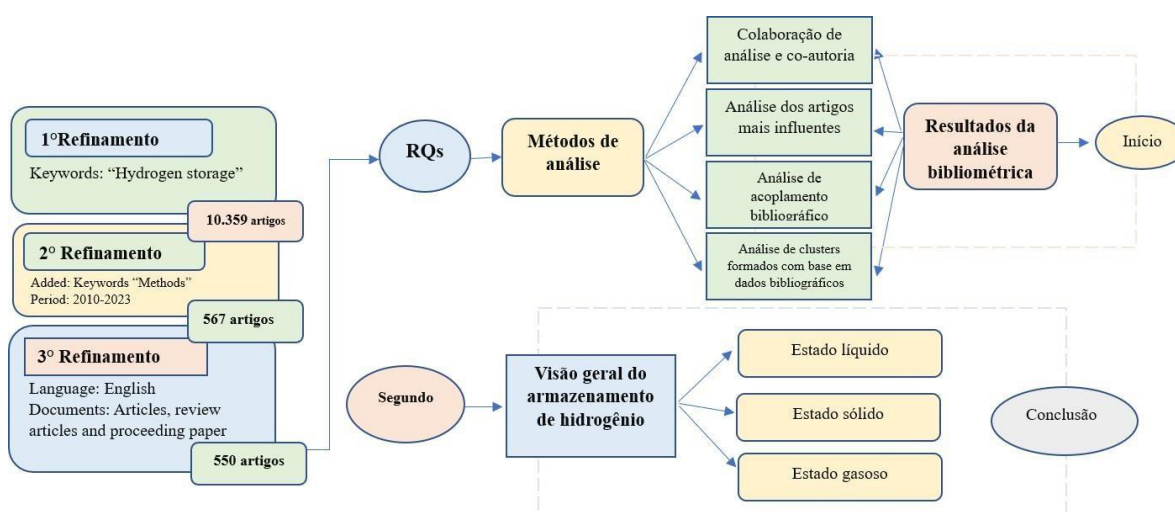
4. METODOLOGIA

4.1 Coleta de dados

Nessa análise de bibliografia sistemática adaptada de (Melo et.al 2023); Sales et.al; Rodrigues et.al; e (Cutumba et al., 2023) foram feitas para analisar o processo de armazenamento de hidrogênio. O banco de dados Web of Science (<https://www.webofscience.com/>) que é uma ferramenta de uma qualidade muito alta, foi utilizada para se fazer as análises. Inicialmente foi usada a palavra “armazenamento de hidrogênio” sobre a forma de título e “métodos” sob forma de tópico, em um período de 2010-2023, isso visa focar nas publicações mais recentes dessa área de pesquisa, outro parâmetro de refinamento usado é do idioma “inglês” e os tipos de documentos, onde foram restringidas a “artigos”, “artigos de revisão” e “artigos de conferência”.

Após o refinamento foram encontradas 550 publicações para se fazer a análise bibliométrica, iniciando-se assim os downloads em janeiro de 2023. Com base nos resultados refinados, propõe-se a responder questões de pesquisa (RQs): Qual a ligação (cooperação) entre países, autores, instituições, revistas? Quais os trabalhos mais influentes nessa área? Quais os temas atuais na literatura sobre esse campo? Quais são as principais palavras-chave dentro do tema armazenamento de hidrogênio?

Figura 1 - Estrutura representativa dos critérios utilizados da pesquisa



Fonte: autor (2023)

4.2 Análise de dados

Os softwares usados para analisar e catalogar os dados para essa análise foram *VOSviewer* (version 1.6.18) (<https://www.vosviewer.com/>), que é uma ferramenta de software para construção e visualização de redes bibliométricas, foi usado para para construir os mapas bibliométricos, facilitando a visualização das análises que foram encontradas nas pesquisas nos bancos de dados. O software permite fazer importação de dados de mapas da base de dados permitindo assim construir mapas de países, organizações, revistas, autores, com base nos dados de citação, cocitação, e mapas de palavras chave baseando na co-ocorrência. *Cite Space* (version 6.1.R4) (<https://www.citespace.podia.com/>), que prevê tendências em áreas de pesquisa usando as palavras chave, do mesmo modo a *bibliometrix* prevê tendências em áreas de pesquisas criando um mapa temático de campo, as planilhas foram usadas para organizar e catalogar os dados assim como *Bibliometrix* através da interface *Biblioshiny* (version 3.0) (<https://www.bibliometrix.org/>), também prevê tendências em áreas de pesquisas, criando um mapa temático de campo. As planilhas foram usadas para organizar e catalogar os dados e planilhas do Microsoft Excel e (Microsoft Office Professional Plus, 2019).

5. RESULTADOS

5.1 Indicadores de Desempenho

Qual é a ligação (cooperação) entre países, autores, instituições e revistas?

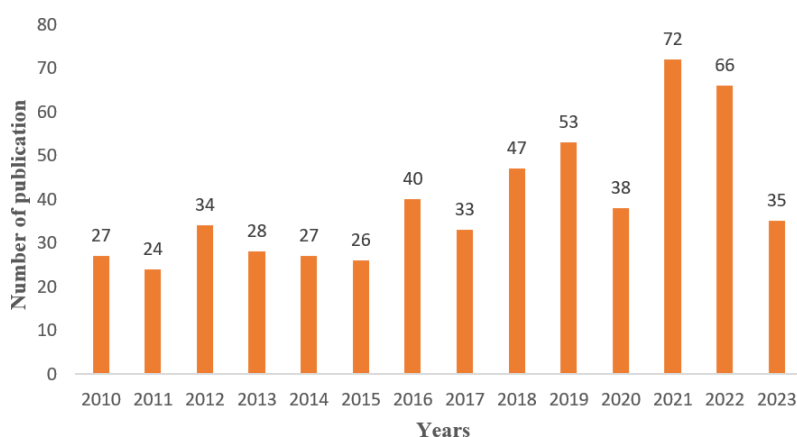
5.1.1 Resultados de Publicações

Começa-se com a pesquisa no Web of Science pela palavra-chave “Armazenamento hidrogênio” como título, foram obtidas 10.359 publicações. Essa busca foi realizada para que se possa ter o número total das publicações e poder ver assim, o início das pesquisas. O primeiro artigo foi publicado em janeiro de 1970 com o título de “Hydrogen storage beam tube, a proposal for a new frequency stand” do Hellwig, h. Do ano 1970 para 1980, ou seja, uma década depois, houve um aumento nos números de publicações, de 1 (uma) publicação em 1970 para 21 publicações em 1980. Com isso, podemos ter uma média de 2 (duas) publicações ao ano, o

que se pode concluir que, nessa época a pesquisa sobre o armazenamento de hidrogênio ainda era muito baixa.

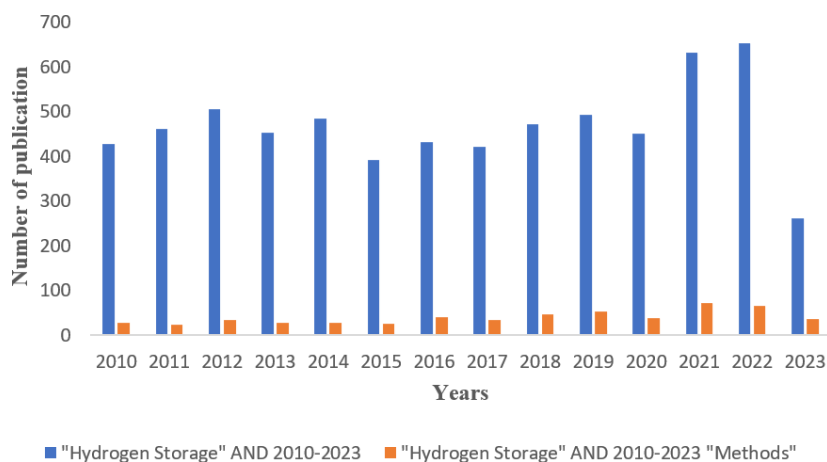
Quando adicionamos a palavra-chave “métodos”, o número de publicações cai para 567 artigos publicados. O refino para o idioma “inglês” foi adicionado, encontrou-se 550 publicações, com o título de maior relevância o “Hydrogen Storage” de (Bondarenko, V. L. et.al, 2022) que fala principalmente sobre o sistema de armazenamento de hidrogênio, suas vantagens e desvantagens, bem como as dificuldades associadas a ele. Métodos e dispositivos de armazenamento avançados e promissores, destinados a reduzir as perdas de hidrogênio durante o armazenamento e transporte.

Figura 2 Número Publicação anual sobre armazenamento de hidrogênio de 2010 a 2023.



Fonte: A autora (2023)

Figura 3 - Número Publicação anual sobre métodos de armazenamento de hidrogênio de 2010 a 2023.



Fonte: A autora (2023)

Consoante as figuras acima ilustradas, o ano com mais publicações com o tema de “Armazenamento de hidrogênio” é 2021 com 72 documentos publicados, adicionando “Métodos” ao período de 2010 a 2023 ao banco de dados da Web of Science, foram encontradas 572 documentos em que o artigo com mais citações está sob o título de “High capacity hydrogen storage materials: attributes for automotive applications and techniques for materials Discovery” do autor Yang, J et.al, 2010) , usando “Métodos” como título, foram encontradas 40 documentos , sendo o título do mais citado “Hydrogen storage: Materials, methods and perspectives” do autor (Niaz, S et.al., 2015.

5.1.2 Distribuição de Revistas Científicas, Países, Autores e Instituições

Ao estudarmos de forma bibliométrica o armazenamento de hidrogênio, encontrou-se publicações entre os anos de 2010-2023 em 203 periódicos, dando em média de 5,74 artigos por revista e 0,55 artigos por ano. Com esses números, pode-se ver o interesse científico crescente na área de armazenamento de hidrogênio. As grandes variedades de autores, países, instituições e periódicos, produzindo cientificamente sobre o tema, mostra uma variedade grande dos pontos de vistas que essa produção científica terá.

Tabela 1 mostra o ranking de 15 periódicos, instituições, países e autores que mais abordaram e publicam sobre o tema, quantidade de publicação e citação, também são mostradas a média de publicação e citação por documento publicado. Analisando os dez jornais que mais publicaram sobre o tema, viu-se que representam 40,5% das publicações na área estudada. A revista com o maior número de publicações é a revista “International journal of hydrogen energy” com 126 publicações, 3573 citações e uma média de 28,4 citações por publicação. Com isso, ele é o periódico com maior número de citação e publicação nesse tema, o segundo periódico com maior número de publicação e citação é o “journal of alloys and compounds” com 22 publicações e 764 citações e uma média de 34,7 citações por publicação. O banco de dados Web of Science também permite analisar informações sobre países de origens declarados pelos autores de artigos publicados. O país que teve maior número de publicação sobre o tema de armazenamento de hidrogênio é a China com 193 publicações que corresponde a 35% do total das publicações, e 4004 citações; USA aparece em segunda posição com 51 publicações e 2635 citações, o que corresponde a 9,27% do total das publicações; a terceira posição é ocupada pela Alemanha e a Índia com 34 publicações cada um, a Alemanha com 1.443 citações e a Índia com 1.723 citações. Nesses quatro países citados, os USA é o país que obteve a maior média

de citações por publicação, obtendo 51,7. De acordo com as afiliações dos autores correspondentes, as duas primeiras instituições que mais publicaram sobre, foram: “Inner Mongolia Univ Sci & Technol” da Mongolia com 28 publicações e 306 citações e; a “Cent iron & Steel res Inst” da China com 27 publicações e 299 citações, compondo 10,18% do total das publicações entre as afiliações. A Universidade Aarhus foi a instituição que teve maior média de citações por publicação, obtendo a média de 143,4. Analisando os autores, os que três que mais publicaram foram Zhangy Yh, Qi Y e Yuan ZM, obtendo 20, 19 e 15 publicações, tendo eles (12,53% do total) e 208, 232 e 132 citações. Entre eles quem tem maior média de citações por publicações foi o Qi Y com 12.

Tabela 1.2.3.4. Classificação dos dez principais periódicos, países, instituições e autores que mais publicaram e foram mais citados de acordo com o banco de dados da web of Science com as palavras “hydrogen storage”, “Methods” no período de 2010 a 2023.

Tabela 1 mostra os países com maior número de citações

Rank	country	Documents	citations	AC
1	China	193	4004	20,7
2	USA	51	2635	51,7
3	Germany	34	1443	42,4
4	India	34	1723	50,7
5	Australia	31	1203	38,8
6	Japan	30	1106	36,9
7	France	29	1183	40,8
8	Iran	29	784	27,0
9	England	24	485	20,2
10	Russia	24	138	5,8

Tabela 2 mostra as instituições com maior número de citações

Rank	Organization	Documents	Citations	AC
1	inner mongolia univ sci & technol	28	306	10,9
2	cent iron & steel res inst	27	299	11,1
3	zhejiang univ	12	477	39,8
4	chinese acad sci	11	234	21,3
5	univ kashan	9	194	21,6
6	univ new south wales	9	470	52,2
7	univ quebec trois rivieres	9	413	45,9
8	univ rostock	9	661	73,4
9	xi an jiao tong univ	9	184	20,4
10	helmholtz zentrum geesthacht	8	449	56,1

Note: NP = Número de publicações; NC =Número de citação; AC = Média de citação (NC/NP).

Tabela 3 mostra os Jornais com maior número de citações

Rank	source	documents	citations	AC
1	international journal of hydrogen energy	126	3573	28,4
2	journal of alloys and compounds	22	764	34,7
3	journal of energy storage	12	404	33,7
4	journal of physical chemistry c	11	383	34,8
5	energies	10	75	7,5
6	international journal of energy research	10	216	21,6
7	rsc advances	10	161	16,1
8	physical chemistry chemical physics	9	172	19,1
9	fuel	7	37	5,3
10	microporous and mesoporous materials	6	245	40,8

Note: NP = Número de publicações; NC =Número de citação; AC = Média de citação (NC/NP).

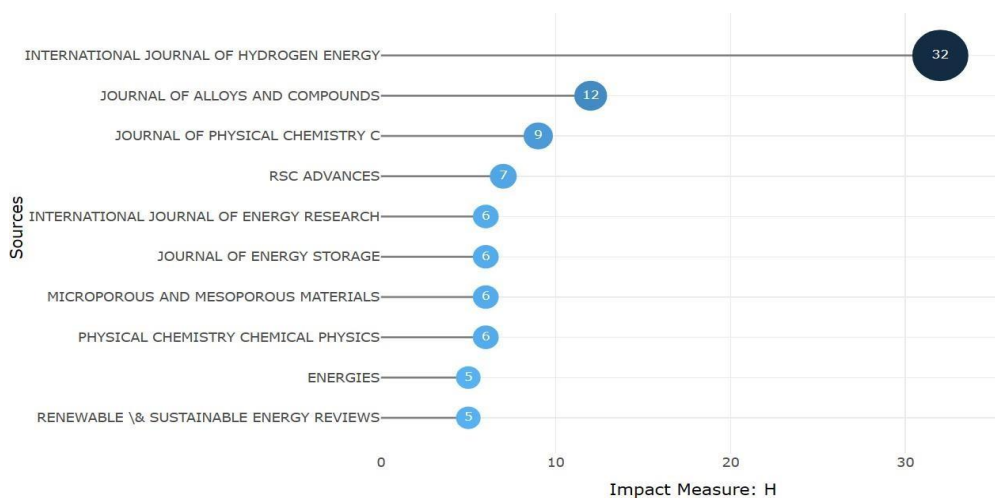
Tabela 4 mostra os autores com maior número de citações

Rank	Author	Documents	Citations	AC
1	zhang, yanghuan	20	208	10
2	qi, yan	19	232	12
3	yuan, zeming	15	139	9
4	guo, shihai	9	124	14
5	salavati-niasari, masoud	8	182	23
6	zhao, dongliang	8	106	13
7	dornheim, martin	7	337	48
8	zhang, yang-huan	7	92	13
9	zhang, wei	7	46	7
10	verevkin, sergey p.	7	17	2

Note: NP = Número de publicações; NC =Número de citação; AC = Média de citação (NC/NP).

Figura 4 Apresenta mais dados sobre as publicações das revistas. A **figura 4 - (A)** demonstra o maior fator impacto H dos dez artigos mais publicados sobre armazenamento de hidrogênio. O International journal of hydrogen energy continua liderando o ranking, obtendo o maior fator de impacto na área, com um valor de 32. Journal of alloys and compounds continua ocupando a segunda posição no rank com o fator H de 12, a terceira posição dessa vez no que se diz respeito ao fator impacto H fica com journal of physical chemistry com 9. Nessa classificação observamos uma diferença grande entre o primeiro do ranking com os demais.

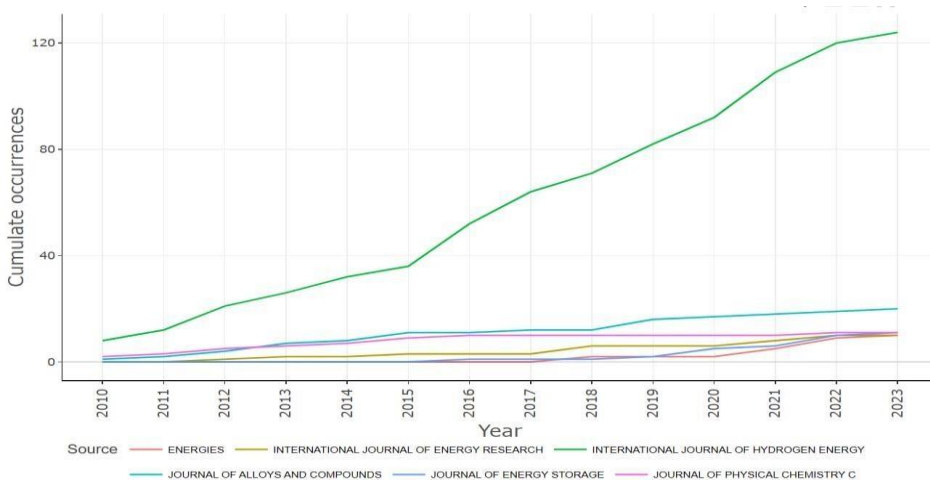
A)



Fonte: autor (2023).

Figura 3 - (B) mostra o crescimento do número de publicações entre 2010 e 2023 dos periódicos que mais publicaram na área. Podemos ver os três mesmos periódicos ocupando as primeiras posições no ranking. Desse modo, conclui-se que atualmente, o International journal of hydrogen energy, Journal of alloys and compounds e Journal of physical chemistry são os periódicos mais sobrestantes em armazenamento de hidrogênio.

B)

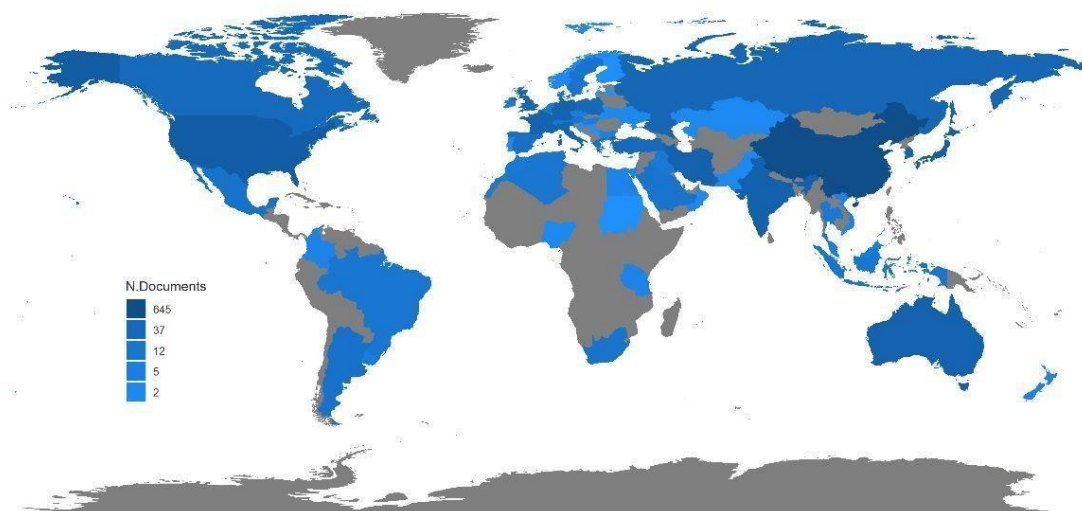


Fonte: autor (2023).

Figura 4. Os principais periódicos que foram publicados entre os anos de 2010 a 2023 na área de armazenamento de hidrogênio. **(A)** Classificação do fator impacto H dos dez jornais que mais falam sobre o assunto em análise. **(B)** Crescimento nos números de publicações dos jornais que mais publicaram na área.

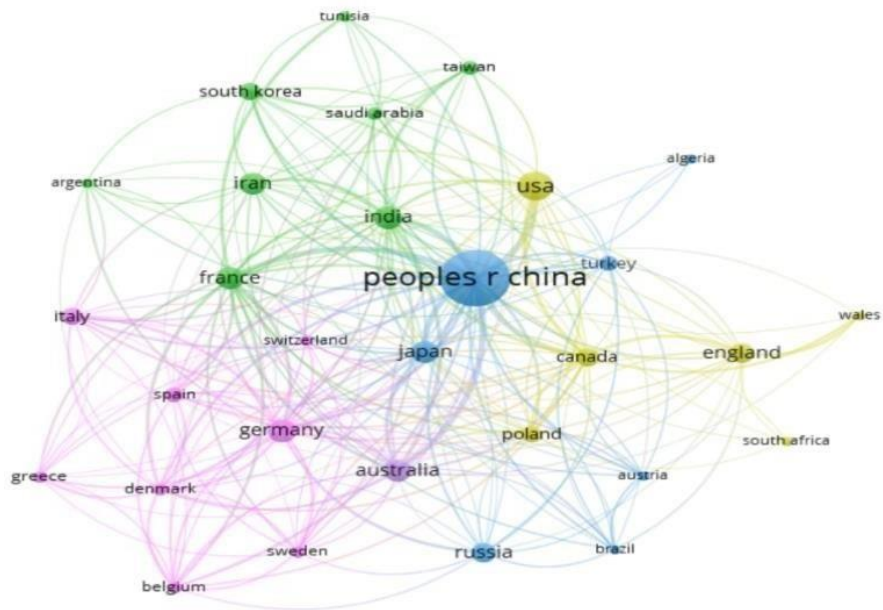
Figura 5 mostra os dados bibliométricos dos países, instituições e autores que foram mais citados na área. **Figura 5 – (A)** apresenta a localização geocodificada do mapa dos países que mais publicaram sobre armazenamento de hidrogênio. Podemos ver que o número de publicações é maior que as do banco de dados, devido publicações conjuntas entre os autores. A região com maior concentração de publicações é na Ásia, América do norte, Europa e o Brasil. Ao mostrar diferentes localizações desses países, vimos muito pouca participação dos países africanos na pesquisa dessa área.

Country Scientific Production



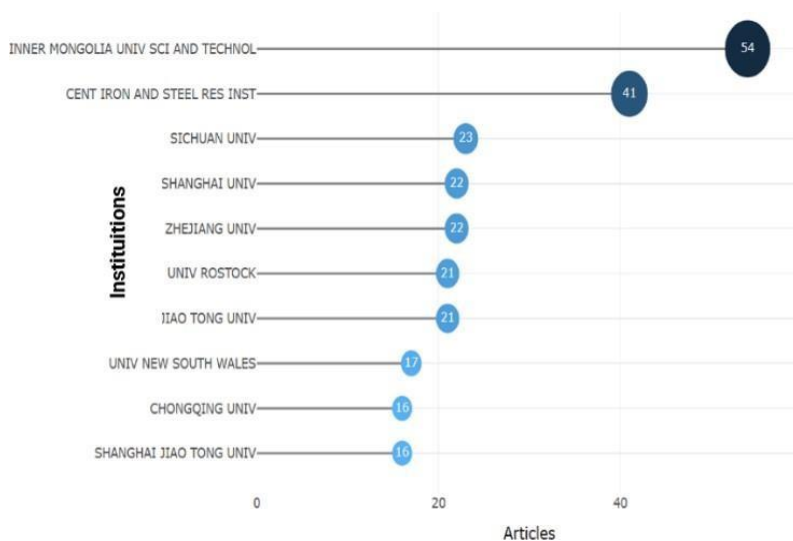
Fonte: autor (2023).

Figura 5 – (B) apresenta o mapa da rede de colaborações entre países identificados com no mínimo 5 citações por país. Diante disso, vimos a formação de redes divididas em quatro cores: azul, amarelo, verde e roxo. A China se destaca como o país com o maior índice de colaborações, seguido pela França, Índia e Canada.



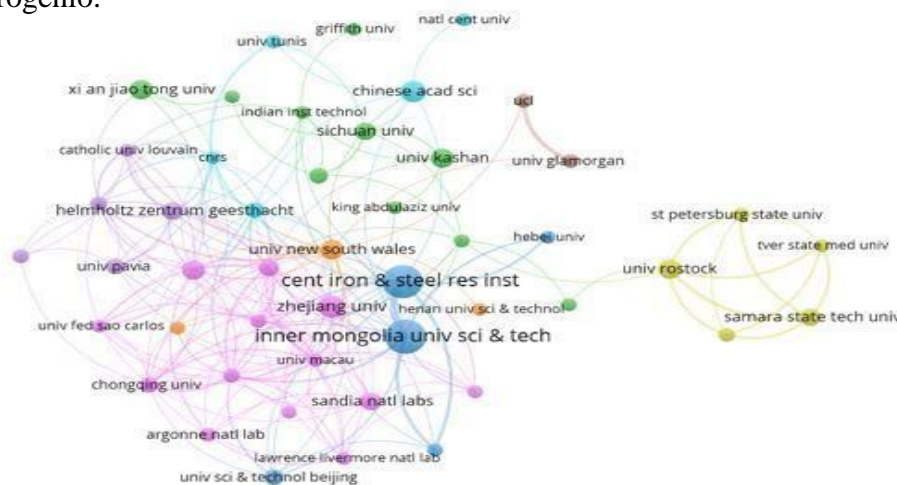
Fonte: autor (2023).

A **figura 5 – (C)** mostra o número de artigos publicados por cada instituição considerando sua colaboração. A Inner mongolia univ sci & technol lidera o ranking com 54 publicações, a Universidade Cent iron & steel res inst com 41 publicações e a Sichuan com 23 publicações.



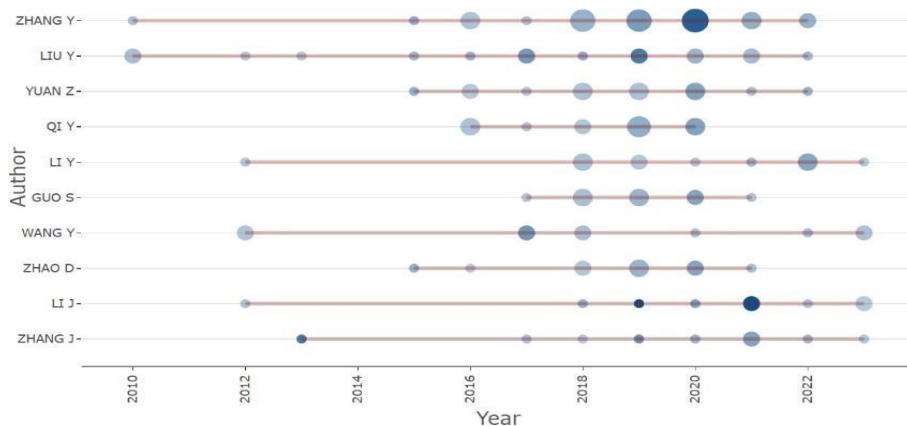
Fonte: autor (2023).

A **figura 5 – (D)** mostra o mapa de rede de colaboração entre instituição com no mínimo 5 citações. Podemos ver grandes grupos delimitados por cores, em azul escuro com a Inner mongolia univ sci & technol destacada, em laranja com a Univ new south wales destacada, em lilás com a Zhejiang univ destacada, em verde com a Xi an jiao tong univ destacada, em azul marinho com a Chinese acad sci destacada e em roxo com Helmholtz zentrum geesthacht destacada. Podemos dizer que essas seis instituições são as mais destacadas em armazenamento de hidrogênio.



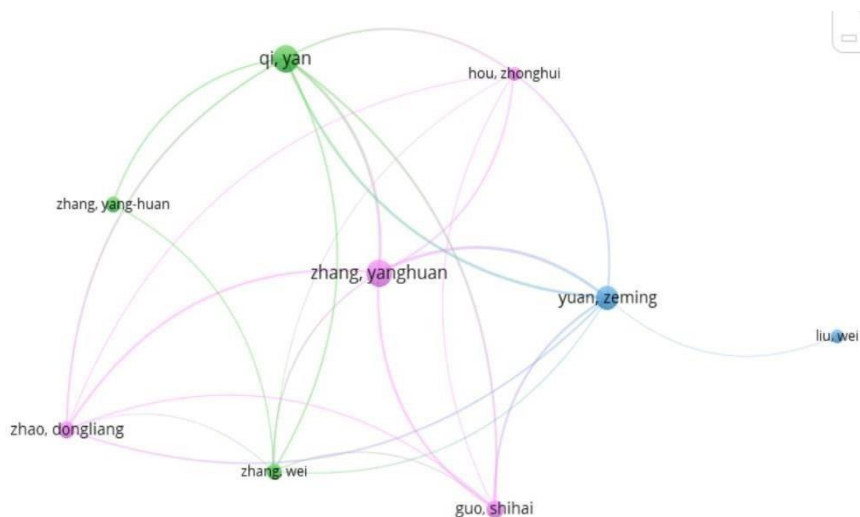
Fonte: autor (2023).

Figura 5 – (E) mostra as publicações dos autores durante o período de 2010-2023. Com essa figura, dá para observar a constância nas publicações dos autores no decorrer dos anos. O autor Liu Y, aparece como o autor mais constante nas suas publicações. Mesmo não fazendo parte no ranking dos autores com mais publicações, ele teve publicações em quase todos os anos da análise. Os autores com maiores publicações como Zhang Y e Qi, yan, apresentam constância apenas nos últimos 7 anos.



Fonte: autor (2023).

Figura 5 – (F) apresenta o mapa de rede de colaboração entre os autores que mais publicaram com no mínimo 5 citações. Três grandes grupos são observados, marcados pelas cores verde, roxo e azul, ao todo 1000 autores diferentes foram identificados. Nesse caso, ao fazermos o refinamento para autores com pelo menos 5 citações, o número cai para 20 autores. Os autores mais influentes, com os números significativos de publicações sobre o tema foram Li qian com (6 artigos 616 citações), Shao Huaiyu com (5 artigos e 500 citações) e Dornheim, Martin com (7 artigos e 337 citações). Estes foram destacados pelos autores dessa área. O artigo mais citado pelo autor mais publicado é “High capacity hydrogen storage materials: attributes for automotive applications and techniques for materials Discovery” que fala sobre como os métodos atuais de armazenamento baseados em meios físicos – gás de alta pressão ou liquefação (criogênica) - dificilmente satisfarão as metas de desempenho e custo, um esforço global de pesquisa com foco no desenvolvimento de meios químicos para armazenar hidrogênio em fases condensadas surgiu recentemente. Atualmente, nenhum material conhecido exibe uma combinação de propriedades que permita aplicações automotivas de alto volume. (Ribeiro, J et.al, 2010).

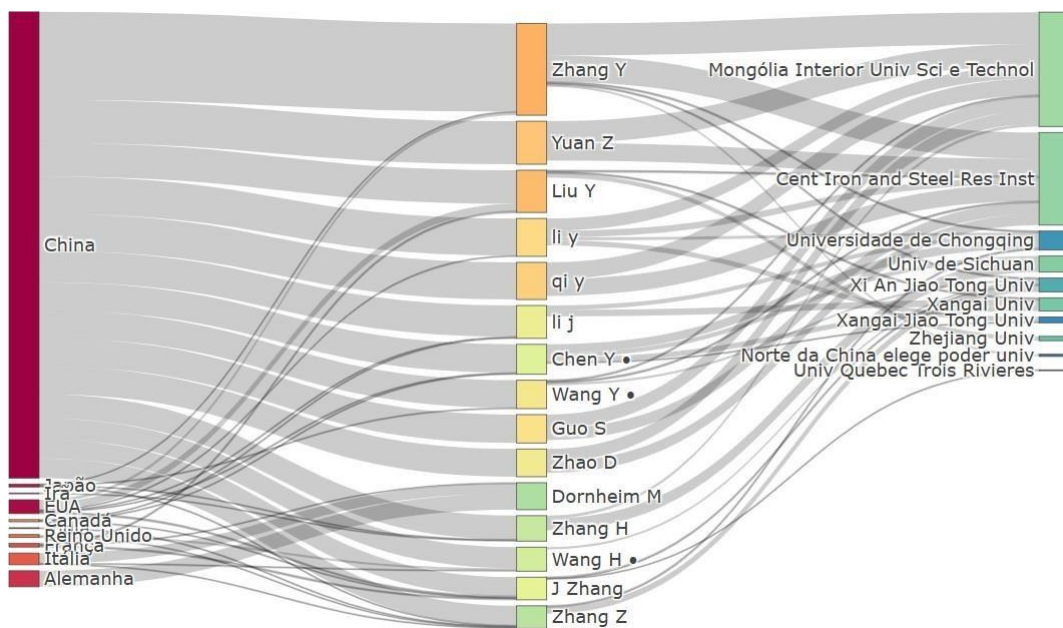


Fonte: autor (2023).

Figura 5. Países, autores e instituições que publicaram nos anos de 2010-2023 em armazenamento de hidrogênio. **(A)** localização geocodificada de cada publicação. **(B)** mapa de rede colaborativo entre países com pelo menos cinco citações. **(C)** publicação por cada instituição tendo em conta a colaboração. **(D)** mapa de rede de colaboração entre instituições com pelo menos 5 citações. **(E)** publicações dos autores durante período. **(F)** mapa de rede de colaboração entre os autores identificados com pelo menos cinco citações.

Figura 6 compara os países, autores e instituições que mais publicaram na área. Olhando para a figura, podemos observar que a China lidera absolutamente no número de publicações, muitos autores e instituições mesmo não declarados chineses, fazem parcerias com a China. Japão e Irão ocupam o segundo e terceiro lugar.

Figura 6. Gráfico dos três campos, países, autores e instituições.



Fonte: A autora (2023).

5.1.3 Pontos de acesso de pesquisa

Quais são os trabalhos mais influentes nesse campo?

5.1.4 Os Artigos mais citados

Um dos indicadores da relevância de uma publicação é a citação (CHEN et.al, 2021). A **Tabela 5** apresenta as publicações mais citadas no período de 2010 a 2023, apresentando os títulos das publicações os autores, anos das publicações, jornais e o número de citações. Em primeiro lugar do ranking dos artigos mais citados encontra-se um artigo que relata sobre a alta capacidade armazenamento de hidrogênio, materiais, atributos para aplicações automotivas e técnicas para descoberta de materiais (Yang, Jun et.al, 2010).

A maioria dos autores das primeiras colocações no ranking são da China. A segunda publicação mais citada com 644 citações, é referente a catálise homogênea para sustentabilidade do armazenamento de hidrogênio em ácido fórmico e álcoois (LAURENCZY et.al, 2018), o terceiro artigo mais citado obteve 499 citações e trata do armazenamento de hidrogênio métodos: materiais e perspectivas (PANDITH, ALTAF HUSSAIN, 2015), os três autores são do mesmo país (Índia) e provenientes da mesma instituição que é a Universidade de Caxemira.

É importante frisar que não existe uma relação direta entre as publicações mais citadas (**tabela 5**) e as revistas mais citadas (**tabela 3**), pois nenhum jornal aparece nas duas listas. É importante observar também a predominância dos trabalhos ligados à materiais e métodos de armazenamento de hidrogênio (KAZEMIAN, HOSSEIN, 2010; PANDITH, ALTAF HUSSAIN, 2015). Ao mostrar de forma mais detalhada o interesse por esse tipo de pesquisa científica, sendo ele um tema promissor.

Uma das características dos artigos mais citados, é o ano da publicação, a maioria dos artigos mais citados foram publicadas a mais de 10 anos, apesar de 2018 ocupar a segunda posição da lista na lista dos 10 artigos mais citados (LAURENCZY, 2018), o que mostra a pesquisa numa visão mais sustentável para o armazenamento de hidrogênio.

Tabela 5. Artigos mais citados dos últimos 13 anos sobre armazenamento de hidrogênio

<i>Rank</i>	<i>Título de Artigo</i>	<i>Autores</i>	<i>Jornais</i>	<i>Ano de publicação</i>	<i>Citação</i>
1	High capacity hydrogen storage materials: attributes for automotive applications and techniques for materials discovery	Yang, Jun; Sudik, Andrea; Wolverton, Christopher; Siegel, Donald J.	CHEMICAL SOCIETY REVIEWS	2010	897
2	Homogeneous Catalysis for Sustainable Hydrogen Storage in Formic Acid and Alcohols	Sordakis, Katerina; Tang, Conghui; Vogt, Lydia K.; Junge, Henrik; Dyson, Paul J.; Beller, Matthias; Laurenczy, Gabor	CHEMICAL REVIEWS	2018	644
3	Hydrogen storage: Materials, methods and perspectives	Niaz, Saba; Manzoor, Taniya; Pandith, Altaf Hussain	RENEWABLE & SUSTAINABLE ENERGY REVIEWS	2015	499
4	Novel hydrogen storage materials: A re-view of lightweight complex hydrides	Jain, I. P.; Jain, Pragya; Jain, Ankur	JOURNAL OF ALLOYS AND COMPOUNDS	2010	353
5	Hydrogen storage: beyond conventional methods	Dalebrook, Andrew F.; Gan, Weijia; Grasemann, Martin; Moret, Severine; Laurenczy, Gabor	CHEMICAL COMMUNICATIONS	2013	339
6	Mechanochemical synthesis of hydrogen storage materials	Huot, J.; Ravnsbaek, D. B.; Zhang, J.; Cuevas, F.; Latroche, M.; Jensen, T. R.	PROGRESS IN MATERIALS SCIENCE	2013	305
7	Hydrogen storage and carbon dioxide capture in an iron-based sodalite-type metal-organic framework (Fe-BTT) discovered via high-throughput methods	Sumida, Kenji; Horike, Satoshi; Kaye, Steven S.; Herm, Zoey R.; Queen, Wendy L.; Brown, Craig M.; Grandjean, Fernande; Long, Gary J.; Dailly, Anne; Long, Jeffrey R.	CHEMICAL SCIENCE	2010	246
8	Tailoring magnesium based materials for hydrogen storage through synthesis: Current state of the art	Rude, Line H.; Nielsen, Thomas K.; Ravnsbaek, Dorthe B.; Boesenberg, Ulrike; Ley, Morten B.; Richter, Bo; Arnbjerg, Lene M.; Dornheim, Martin; Filinchuk, Yaroslav; Besenbacher, Flemming; Jensen, Torben R.	PHYSICAL STATUS SOLIDI APPLICATIONS AND MATERIALS SCIENCE	2011	226
9	Tailoring properties of borohydrides for hydrogen storage: A review	Lim, Kean Long; Kazemian, Hossein; Yaakob, Za-hira; Daud, Wan Ramli Wan	CHEMICAL ENGINEERING & TECHNOLOGY	2010	224
10	Solid-state Materials and Methods for Hydrogen Storage: A Critical Review	Sun, Yahui; Shen, Chaoqi; Lai, Qiwen; Liu, Wei; Wang, Da-Wei; Aguey-Zinsou, Kondo-Francois	ENERGY STORAGE MATERIALS	2018	221

Fonte: A autora (2023).

5.1.5 Temas de pesquisa de Fundo

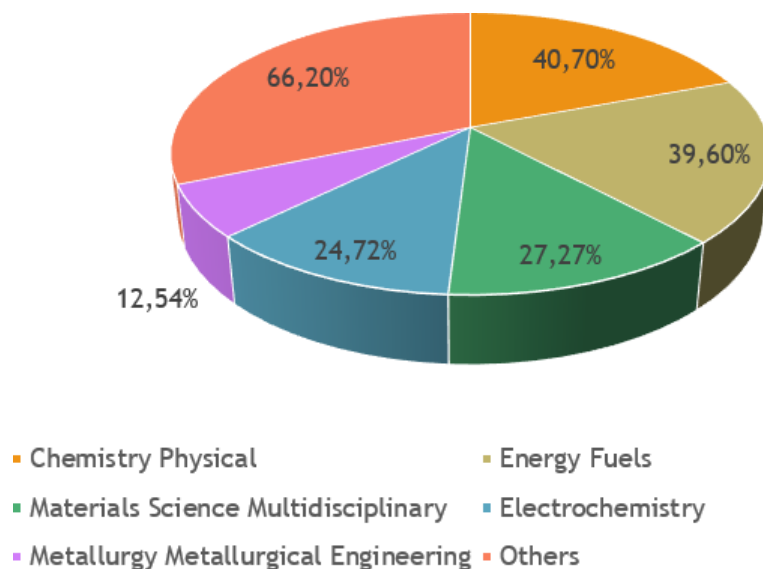
Quais são os temas atuais na literatura existente?

5.1.6 Tópicos de Pesquisa

Os artigos de 2010 a 2023 vistos no banco de dados da Web of Science relacionados ao armazenamento de hidrogênio foram atribuídos a 57 áreas diferentes de conhecimento. Muitos artigos estão inclusos em mais de uma área de pesquisa, 41 dessas áreas tem menos de 10 artigos atribuídos a eles. A figura 6 apresenta 5 principais áreas de pesquisa, respondendo por cerca de 90,1% dos artigos publicados. “Química – física” é a área de pesquisa mais comum com 224 artigos publicados envolvendo novos materiais de armazenamento de hidrogênio, uma revisão dos hidretos complexos leves. As próximas áreas de pesquisa foram “combustíveis energéticos” e ciência dos materiais multidisciplinar, com 218 e 150 registros publicados envolvendo armazenamento de hidrogênio, materiais, métodos e perspectivas; síntese mecanoquímica de materiais de armazenamento de hidrogênio. Na quarta posição ficou “eletroquímica” com 136 artigos publicados sobre sistema de hidreto de sódio para armazenamento eficiente de hidrogênio.

Há um grande potencial no método de armazenamento de hidrogênio, com vários artigos em diferentes áreas de pesquisa armazenamento de hidrogênio além dos métodos convencionais, que vão desde meios físicos envolvendo adsorventes sólidos, até materiais químicos, incluindo hidreto metálico, borano de amônia e precursores líquidos, como álcoois e ácido fórmico (LAURENCZY et.al, 2013), nanotecnologia em materiais à base de Mg para armazenamento de hidrogênio (SHAO, HUAIYU, 2012). Também o desenvolvimento e aplicação de armazenamento de hidrogênio, métodos de armazenamento relativamente avançados, como o uso de hidretos de estrutura metal-orgânica e materiais de carbono, estão sendo desenvolvidos como alternativas promissoras. A combinação química e física do armazenamento de hidrogênio em determinados materiais tem vantagens potenciais entre todos os métodos de armazenamento. Pesquisas intensivas têm sido conduzidas em hidretos metálicos para melhorar suas propriedades eletroquímicas e de armazenamento de hidrogênio gasoso, incluindo sua capacidade de armazenamento de hidrogênio, cinética, estabilidade do ciclo, pressão e resposta térmica, que são dependentes da composição e característica estrutural das ligas (Zhang, 2015).

Figura 7. Distribuição das áreas de pesquisa de artigos sobre armazenamento de hidrogênio.

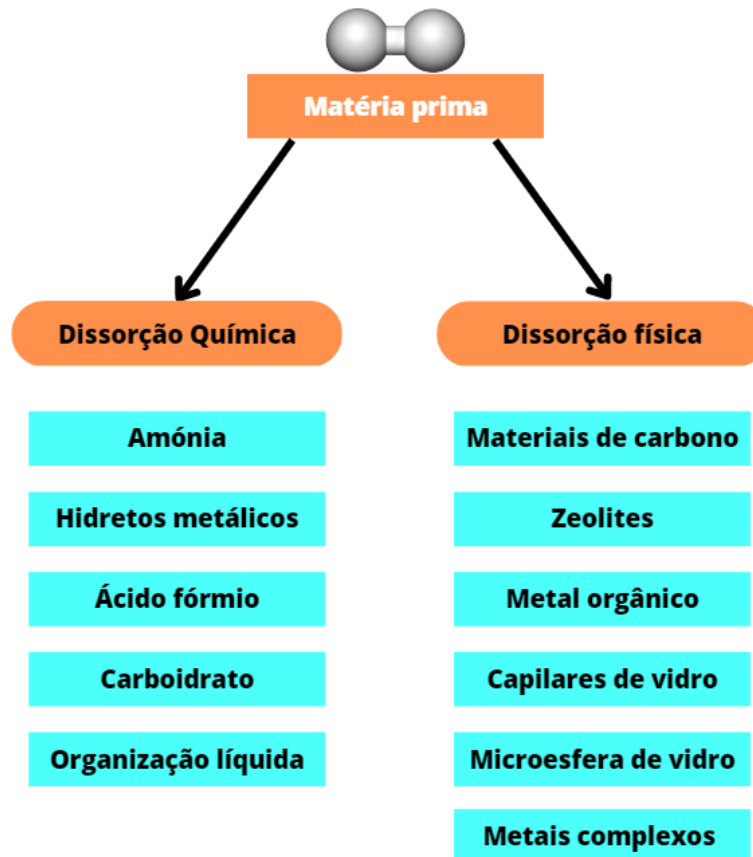


Fonte: A autora (2023).

5.2 Classificação por Tópico de Pesquisa

Uma grande variedade de materiais causa uma influência direta ao armazenamento de hidrogênio. Na tabela 8 apresenta diferentes estados de armazenamento de hidrogênio, sabemos que o hidrogênio a temperatura ambiente e a pressão atmosférica encontra-se em estado gasoso, e uma das maneiras de armazená-lo nesse estado é através da compressão em tanques de alta pressão, esse armazenamento é o método mais disponibilizado para a aplicação comercial, principalmente devido a sua simplicidade comparado com outros métodos (ZHOU, 2005). Para armazená-lo são utilizados tanques cilíndricos de aço, polímeros, fibras de carbono, microesferas de vidro, gasares, zeólites e metais orgânicos. O armazenamento em estado líquido é feito em tanques criogênicos e em tanques híbridos. Em estado sólido, o hidrogênio é armazenado na forma de hidretos, hidretos metálicos, hidretos complexos e hidretos químicos.

Figura 8 Matéria prima para armazenar hidrogênio em diferentes estados

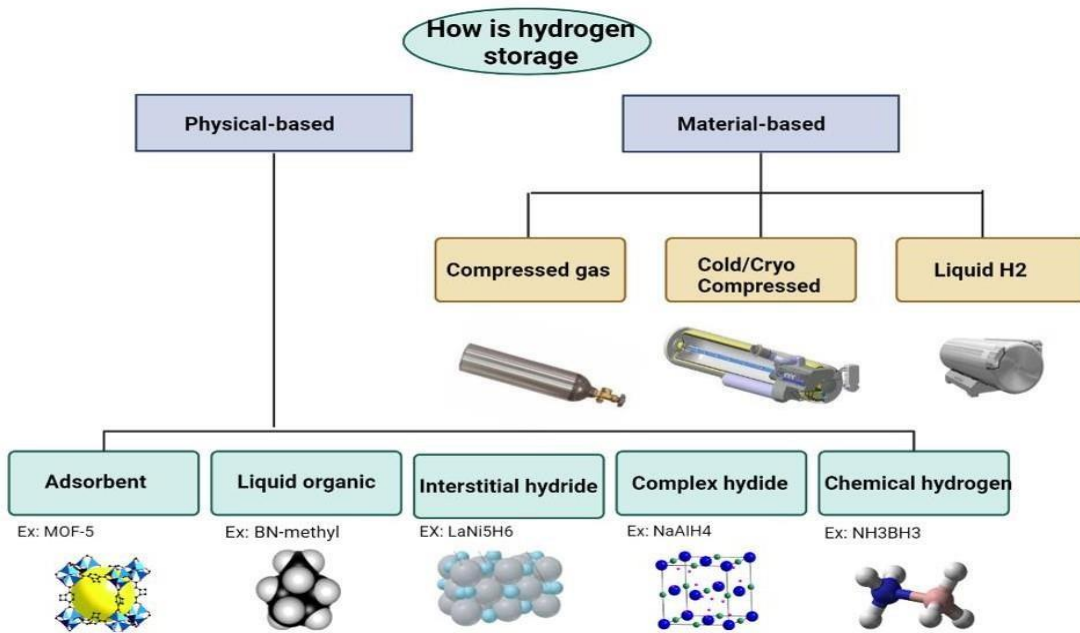


Fonte: A autora (2023).

5.3 Como é armazenado o hidrogênio?

Figura 9. Mostra que hidrogênio também pode ser armazenado em materiais sólidos que possuam alta capacidade de absorção ou adsorção de hidrogênio. Esses materiais são chamados de materiais de armazenamento de hidrogênio. Eles podem ser compostos orgânicos, como hidretos metálicos, ou materiais porosos, como líquido orgânico ou carbono ativado. A base física desse método é a interação do hidrogênio com os materiais de armazenamento, onde ocorre a absorção ou adsorção do hidrogênio em sua estrutura. Esses materiais sólidos permitem armazenar o hidrogênio em uma forma compacta e liberá-lo quando necessário.

Figura 9. Base física do armazenamento de hidrogênio.

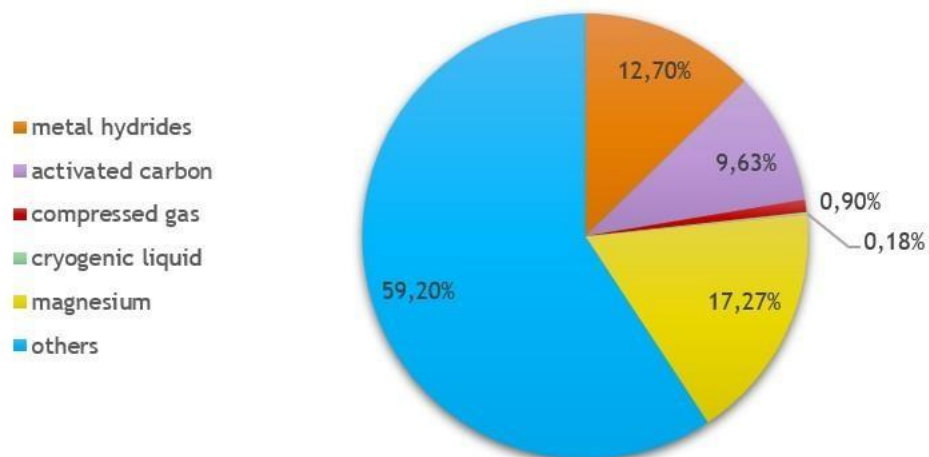


Fonte: A autora (2023).

Figura 10. Mostra matérias primas para o armazenamento de hidrogênio: **figura 10- (A)** Percentagem dos artigos sobre matérias primas específicas; **a figura 10- (B)** Número de publicações mencionando diferentes matérias primas nos títulos a que pertencem.

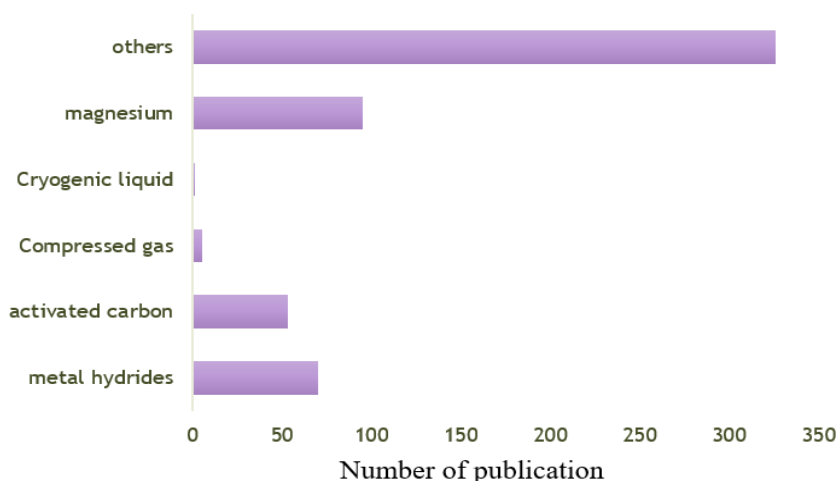
Figura 10. Matérias primas para o armazenamento de hidrogênio

A)



Fonte: A autora (2023).

B)



Fonte: A autora (2023).

A figura 10. Mostra o nível de ocorrência de algumas matérias primas utilizadas no armazenamento de hidrogênio presentes nos 550 documentos analisados. É possível ainda analisar nos gráficos que magnésio e outros, ocupam posição de destaque nas publicações. O líquido criogênico é a matéria prima com menos números de artigos dentre os analisados.

É importante ressaltar que critérios foram usados para o refinamento neste caso, foi da mesma forma que a busca inicial, porém, acrescentando o operador logico “AND” e utilizando os seguintes tópicos de busca no campo da palavra-chave: “Metal hydrides” adicionando ainda as palavras-chave de início, “armazenamento de hidrogênio”, “métodos” e os anos de delimitação 2010-2023, esse mesmo processo foi feita para os demais tópicos separadamente. Os hidretos são materiais compostos por hidrogênio e um metal, como paládio, titânio, magnésio, entre outros. Os hidretos metálicos têm a capacidade de absorver e liberar hidrogênio, permitindo um armazenamento seguro e eficiente Züttel, A. (2003). Vimos ainda uma outra matéria prima que é o carbono ativado, sendo ele um material poroso, derivado de materiais carbonáceos como carvão ou cascas de coco, que possui uma grande área de superfície. O carbono ativado pode adsorver moléculas de hidrogênio, permitindo seu armazenamento (Schlapbach, L., & Züttel, A. 2001).

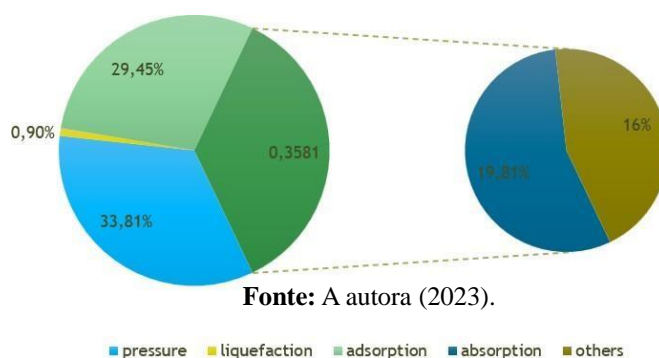
5.3.1 Magnésio

O magnésio é um material que tem sido amplamente estudado para o armazenamento de hidrogênio. Ele tem a capacidade de formar hidretos metálicos reversíveis, permitindo a absorção e a liberação de hidrogênio de maneira controlada. Aqui estão algumas referências

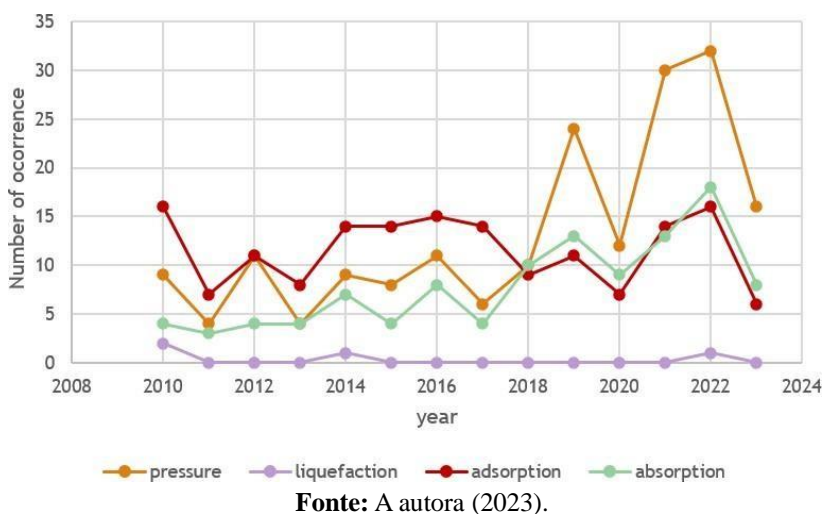
que abordam o uso do magnésio no armazenamento de hidrogênio (Yıldız, B., Gürü, M., & Veziroğlu, T. N 2019).

Figura 11. Apresenta alguns métodos utilizados no armazenamento de hidrogênio. Sabemos que existem diversos métodos de armazenamento de hidrogênio, cada um com suas características e aplicações específicas. A figura 11–(A) mostra alguns dos principais métodos de armazenamento de hidrogênio

A)



B)



Na **figura 11- (A)** Podemos ver os percentuais dos métodos de armazenamento de hidrogênio, em que o método com mais número de publicação é o método da compressão com 33,81% dos artigos publicados, logo em seguida, vem o método de 29,45% dos artigos

publicados. O método com menos publicações é o da liquefação com apenas 0,9% de artigos publicados. O hidrogênio é comprimido e armazenado em tanques de alta pressão. Essa abordagem permite um armazenamento relativamente simples e é adequada para aplicações de curto prazo, como abastecimento de veículos a hidrogênio (Liu, D., Yu, Q., Sun, T., & Zhang, Y. 2017). Apesar do método da liquefação ter tão poucos artigos, ele é um método muito interessante, o hidrogênio é resfriado a temperaturas extremamente baixas (-253°C) para se tornar líquido e, em seguida, armazenado em tanques criogênicos. O armazenamento em forma líquida permite uma densidade de energia maior do que o armazenamento comprimido, mas requer técnicas avançadas de isolamento e manuseio.

A **figura 11 - (B)** mostra a evolução do número de ocorrência nos anos de 2010 a 2023, observando a figura dá para observar que existe uma constância de número de publicação certos métodos e outras nem tanto, como é o caso de compressão e liquefação.

5.3.2. Áreas temáticas de pesquisa atual

O que se pode esperar para o futuro da pesquisa neste campo?

5.3.3 Análise quantitativa das palavras-chave mais frequentes

A análise de palavras-chave é uma técnica usada na análise de texto para identificar e extrair as palavras-chave mais relevantes de um documento ou conjunto de documentos (Manning, C. D., Raghavan, P., & Schütze, H. 2008).

O principal objetivo da análise de palavras-chave é obter insights sobre os principais temas, tópicos e tendências presentes nos textos analisados. Isso é feito identificando palavras ou termos que ocorrem com frequência significativa em documentos e desempenham um papel importante na representação do conteúdo (Feldman, R., & Sanger, J. 2006). força total do link das 20 principais palavras-chave nesta análise bibliométrica. Esta tabela indica os tópicos mais discutidos no campo da pesquisa nos últimos 13 anos. Armazenamento de hidrogênio (220), Adsorção (99), Cinética (71), Capacidade (55) e Desempenho (54) são os tópicos mais proeminentes no campo de pesquisa nos últimos 13 anos. Desidrogenação (45), energia (43), comportamento (42) e estruturas de metais orgânicos (42) são os temas principais da pesquisa.

Tabela 6. Classificação das palavras-chave mais cruciais nos artigos analisados.

Rank	Keyword	Frequency	TLS	Rank2	keyword3	Frequency2	TLS2
1	Hydrogen storage	220	525	11	Magnesium Hydride	37	135
2	Adsorption	99	224	12	Absorption	35	95
3	Kinetics	71	267	13	Thermodynamics	35	166
4	Capacity	55	141	14	carbon	32	86
5	Performance	54	174	15	desorption	31	138
6	Dehydrogenation	45	142	16	microstructure	31	127
7	Energy	43	136	17	complex hydrides	30	81
8	Behavior	42	149	18	nanoparticles	28	101
9	Metal-organic Frameworks	42	110	19	carbon nanotubes	25	74
10	Ni	38	158	20	design	25	43

Fonte: A autora (2023).

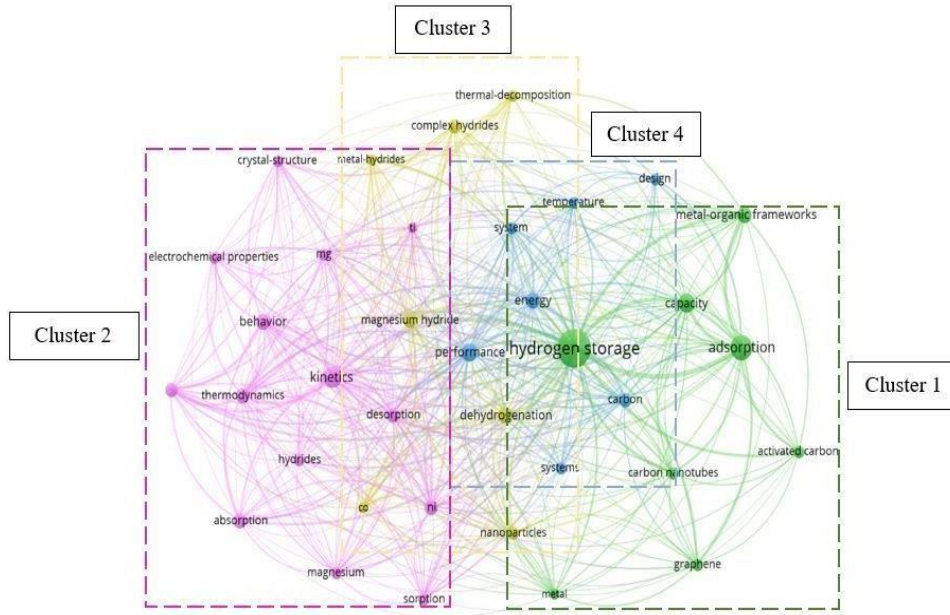
Nota: TLS = total link strength.

A **figura 12**, mostra o mapa de rede de visualizações obtidos no VOSviewer para as 36 palavras-chave mais importantes, com pelo menos 15 ocorrências. Quatro clusters são formados, onde o maior cluster marcado em verde, consiste na palavra-chave “armazenamento de hidrogênio” ligadas em outras várias áreas.

O cluster roxo tem a palavra “Kinetics” como a palavra-chave mais citada, o cluster amarelo tem a palavra “Dehydrogenation” como a palavra-chave mais citada, enquanto, o cluster azul tem a palavra “Performance” como a palavra-chave mais citada **figura 12–(A)**. Também podemos ver a partir do diagrama que todos os clusters estão intercalados e tem várias outras

palavras com links sólidos. O rótulo dos clusters e quantos e nós o representavam foram buscados no Citespace. A (figura 12-(B)) e a (figura 12-(C)) mostra o período em que as palavras-chave começam a se formar.

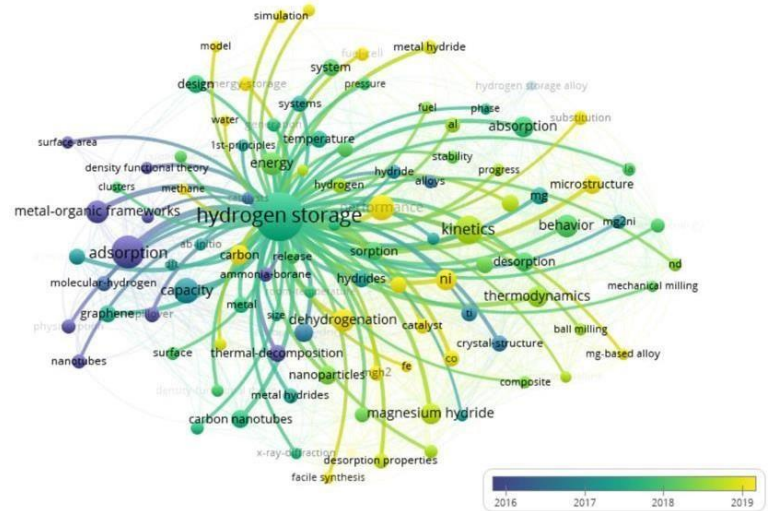
A)



B)



C)



Fonte: A autora (2023).

Figura 12. As principais palavras-chave formam clusters. A figura 12-(A) Mapeamento de cocitações de palavras-chave em artigos no Web of Science sobre armazenamento de hidrogênio. A figura - (B) e (C) mapeamento de asas de palavras-chave com indicação de período.

O software Citespace foi usado para analisar, organizar e coletar dados obtidos na pesquisa bibliométrica, o Citespace permite que os pesquisadores analisem a estrutura e os padrões de citação em um conjunto de artigos científicos, identificando as principais áreas de pesquisa, autores influentes, tendências emergentes e conexões entre diferentes campos do conhecimento. Com base nas citações bibliográficas presentes nos artigos, o software cria representações visuais das redes de citações, como mapas de citações, gráficos e diagramas, que facilitam a compreensão e a análise dos relacionamentos entre os trabalhos científicos. Uma análise de palavras-chave é sem dúvida uma ferramenta de grande importância na pesquisa sobre armazenamento de hidrogênio.

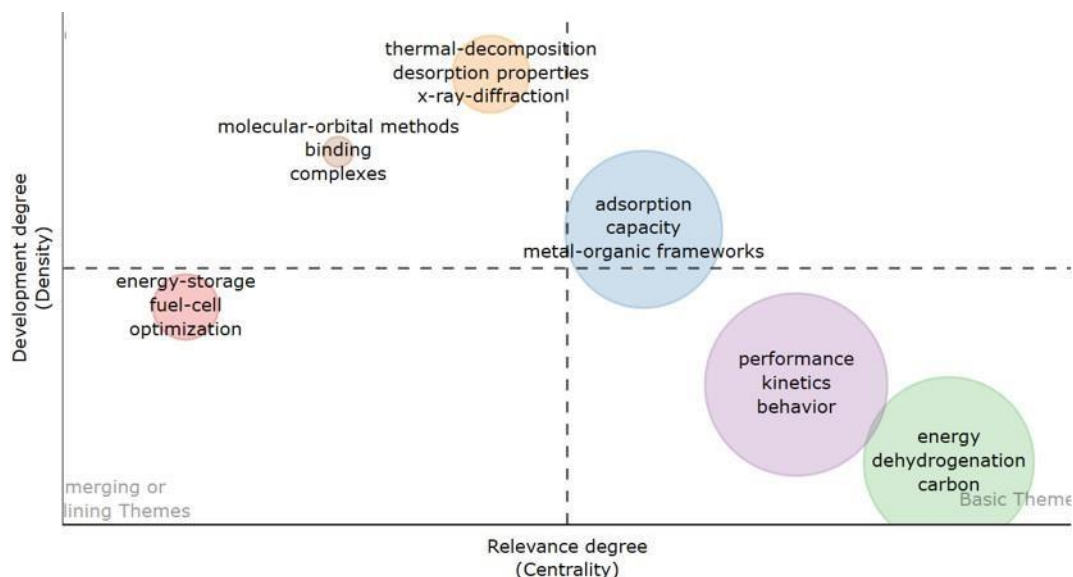
5.4 Mapas Temático

O mapa temático foi realizado usando o R bibliometrix 3.0 através da interface biblioshiny. Esta interface da Web para o pacote tecnológico Bibliometrix, apoia os pesquisadores no uso de dados e informações gerados na bibliometria. Desenvolvido para a linguagem R, ele fornece um conjunto de ferramentas para pesquisas relacionadas à bibliometria e à cientometria, como afirmam seus idealizadores (Caroline Lorensi da Silva et.al, 2020). Essa interface pode ser usada em conjunto com Citespace para obter uma expectativa razoável de como está se desenvolvendo a pesquisa. O mapa temático apresenta dois eixos, onde o eixo X representa centralidade e Y representa a densidade. A centralidade mede e representa a correlação entre os tópicos, e a densidade mede o grau da coesão, ou seja, à concentração de um determinado fenômeno ou objeto geográfico em uma determinada área. Nos mapas temáticos, a centralidade indica a importância de um determinado tema, enquanto a densidade indica a capacidade de desenvolvimento sustentabilidade.

A **figura 13**. Mostra o mapa temático para a análise realizada nesta pesquisa, que indica os principais tópicos relacionados ao armazenamento de hidrogênio

Os temas “energy”, “dehydrogenation” e “carbon” têm alta centralidade e baixa densidade, eles são considerados temas básicos na pesquisa na área. “adsorption”, “capacity” e “metal-organic frameworks” são considerados temas de condução, ou seja, são impulsionadores de pesquisa. Dando continuidade as avaliações, podemos ver que “energy-storage”, “fuel-cell” e “optimization” são considerados temas mais crescentes na pesquisa atual.

Figura 13. Mapa temático para a pesquisa sobre armazenamento de hidrogênio



Fonte: A autora (2023).

5.4.1 Implicações para a pesquisa: Perspectivas e oportunidades futuras

O armazenamento de hidrogênio desempenha um papel crucial na viabilidade e expansão das tecnologias de energia baseadas em hidrogênio. Embora ainda haja desafios técnicos e econômicos a serem superados, existem várias oportunidades e perspectivas futuras promissoras para o armazenamento de hidrogênio. Aqui estão algumas delas:

Avanços em tecnologias de armazenamento: Pesquisas e desenvolvimentos estão em andamento para melhorar as tecnologias de armazenamento de hidrogênio. Isso inclui o desenvolvimento de materiais de armazenamento avançados, como hidretos metálicos, nanomateriais, adsorventes e materiais à base de carbono. Esses avanços podem resultar em maior densidade de armazenamento, maior segurança e eficiência aprimorada (International Energy Agency). A integração com energias renováveis é uma perspectiva a se falar, visto que, o armazenamento de hidrogênio pode desempenhar um papel fundamental na integração de energias renováveis intermitentes, como a solar e a eólica. O hidrogênio produzido a partir dessas fontes de energia

pode ser armazenado e posteriormente convertido de volta em eletricidade ou usado como combustível em momentos de alta demanda, (R. F. Martyushev et.al, 2018).

5.4.2 Aspectos económicos e viabilidade técnica

A viabilidade técnica e econômica do armazenamento de hidrogênio é um aspecto crucial a ser considerado para sua implementação em larga escala (RAPPAPORT, Theodore S et.al, 2011).

O crescente interesse da Europa pelo hidrogênio renovável não é único. O Japão está planejando uma mudança para uma “sociedade do hidrogênio” que foi incorporada à política energética oficial desde 2014. Cumprir um dos primeiros objetivos do Japão seria demonstrar uma tecnologia para importar hidrogênio de forma eficiente.

Nos Estados Unidos, há sinais de renovado interesse pelo hidrogênio. O governo federal está mais uma vez estabelecendo metas para tecnologias de hidrogênio, algumas empresas de energia estão investindo e alguns estados estão oferecendo suporte. O custo de produção de hidrogênio de baixo carbono pode ser o maior desafio para o futuro do hidrogênio renovável. Para começar a substituir o hidrogênio cinza na indústria, o custo de produção de hidrogênio renovável precisa cair de cerca de US\$ 6/kg ou mais para US\$ 2/kg ou menos. Vários estudos indicam que isso pode acontecer até 2030, se os custos dos equipamentos de produção (eletrolisadores) continuarem caindo, como nos últimos anos (Nivalde de Castro et.al, 2023).

A análise da IRENA (2019) estima que, até 2050, o H₂ corresponda a 6% do consumo final total de energia. Já segundo as estimativas do Hydrogen Council (2017), será necessário efetuar mudanças continuadas para reduzir as emissões relacionadas ao CO₂ em 60% até 2050, mesmo considerando que globalmente haverá um aumento populacional de cerca de dois bilhões de habitantes e, também, a inclusão de uma parcela substancial de consumidores de energia e de bens nos mercados emergentes.

O Conselho evidencia, assim, uma adoção do hidrogênio ainda mais acelerada, correspondendo a 18% da demanda final de energia até 2050.

5.4.3 Oportunidades e aplicações futuras de matérias-primas de armazenamento de hidrogênio.

As matérias-primas utilizadas para o armazenamento de hidrogênio desempenham um papel crucial no desenvolvimento de tecnologias eficientes e viáveis. Avanços recentes na pesquisa de materiais estão abrindo novas oportunidades e aplicações futuras emocionantes para o armazenamento de hidrogênio.

Materiais de armazenamento baseados em hidretos metálicos: Os hidretos metálicos são compostos que podem absorver e liberar hidrogênio, tornando-se uma opção promissora para o armazenamento seguro de hidrogênio. A pesquisa está focada no desenvolvimento de hidretos metálicos com alta capacidade de armazenamento, rápida taxa de absorção e liberação de hidrogênio, além de estabilidade térmica e ciclabilidade. Um estudo de Pires et al. (2020) investiga as propriedades e aplicações dos hidretos metálicos para o armazenamento de hidrogênio.

Armazenamento de hidrogênio em materiais porosos: Materiais porosos, como zeólitas, MOFs (Metal-Organic Frameworks) e COFs (Covalent Organic Frameworks), também estão sendo explorados para o armazenamento de hidrogênio. Esses materiais possuem uma estrutura altamente porosa, que permite a absorção e armazenamento eficiente de hidrogênio em suas cavidades. O estudo de Zhao et al. (2020) revisa os avanços recentes e as aplicações potenciais de materiais porosos para o armazenamento de hidrogênio.

Figura 14: Perspectivas emergentes do hidrogênio, sua produção, armazenamento e transporte.



Fonte: A autora (2023).

5.4.4 Limitações de pesquisa

A pesquisa bibliométrica é uma metodologia que utiliza indicadores quantitativos para analisar a produção científica de uma área, um autor, uma instituição ou um país. Essa abordagem permite identificar tendências, padrões, lacunas e impactos da ciência em diferentes contextos Araújo, C. A. (2006). No entanto, a pesquisa bibliométrica também apresenta algumas limitações que devem ser consideradas pelos pesquisadores.

Uma das limitações da pesquisa bibliométrica é a dependência das bases de dados utilizadas para coletar e processar as informações. Nem todas as bases de dados possuem a mesma cobertura, qualidade e atualização dos dados, o que pode gerar vieses e inconsistências nos resultados. (Glänzel W et.al, 2003).

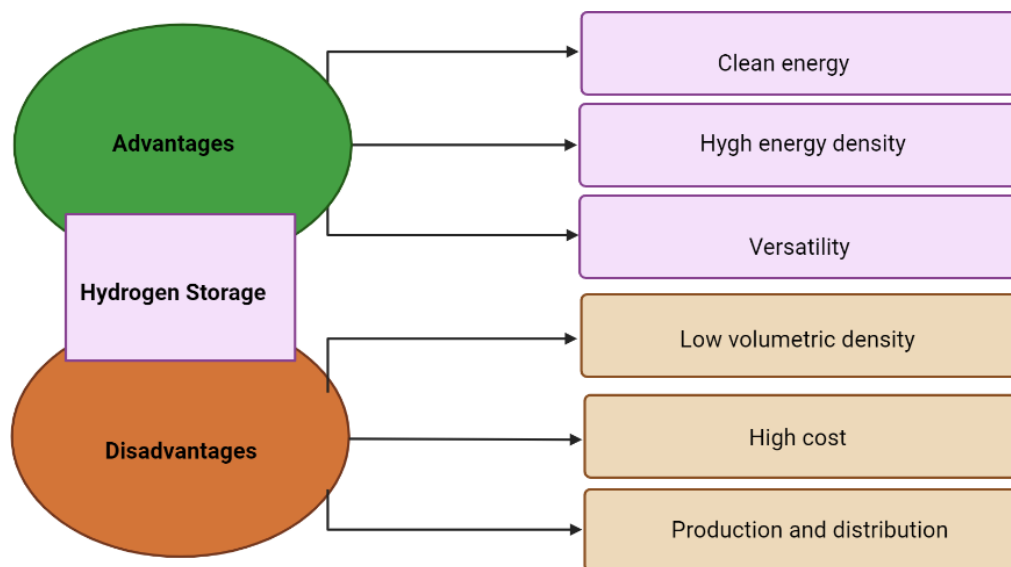
Figura 15. Mostra as vantagens e desvantagens de armazenamento de hidrogênio, aonde vimos que as vantagens são vastas, mas foi escolhida três para serem abordadas, a primeira vantagem é o fato dela ser uma fonte de energia limpa, pois sua queima não emite gases de efeito estufa e ainda, quando utilizados em células de combustíveis, produz apenas água como subproduto.

Outra vantagem é a alta densidade energética, em comparação com as outras formas de armazenamento de energia, como por exemplo, baterias. Isso nos mostra uma quantidade relativamente pequena de hidrogênio pode armazenar uma grande quantidade de energia. Ainda falando sobre as vantagens, podemos observar a sua versatilidade quanto a utilização, podendo ser utilizada em uma variedade de aplicações energéticas, incluindo transporte, geração de energia e armazenamento de energia renovável. Podendo ser usado em veículos a hidrogênio.

Como tudo que tem vantagens, sempre tem algumas desvantagens e no armazenamento de hidrogênio não é diferente, uma das desvantagens é a baixa densidade volumétrica, apesar de ter uma alta densidade energética, ela apresenta uma densidade volumétrica baixa, isso quer dizer que ele ocupa muito espaço em sua forma gasosa, o que pode dificultar o ser armazenamento e transporte. Outra situação não muito boa é o fato da produção, armazenamento e transporte dela ser muito custoso em comparação as outras energias em comparação com as outras formas de energia e o fato também da sua produção e distribuição ainda ser

predominantemente baseada, mas fontes não renováveis com é o caso do gás natural (Choi, J., & Gür, T. M. 2018)

Figura 15. Mostra algumas vantagens e desvantagens relacionados ao armazenamento de hidrogênio



Fonte: A autora (2023).

5.5. Patentes com métodos de armazenamento de hidrogênio

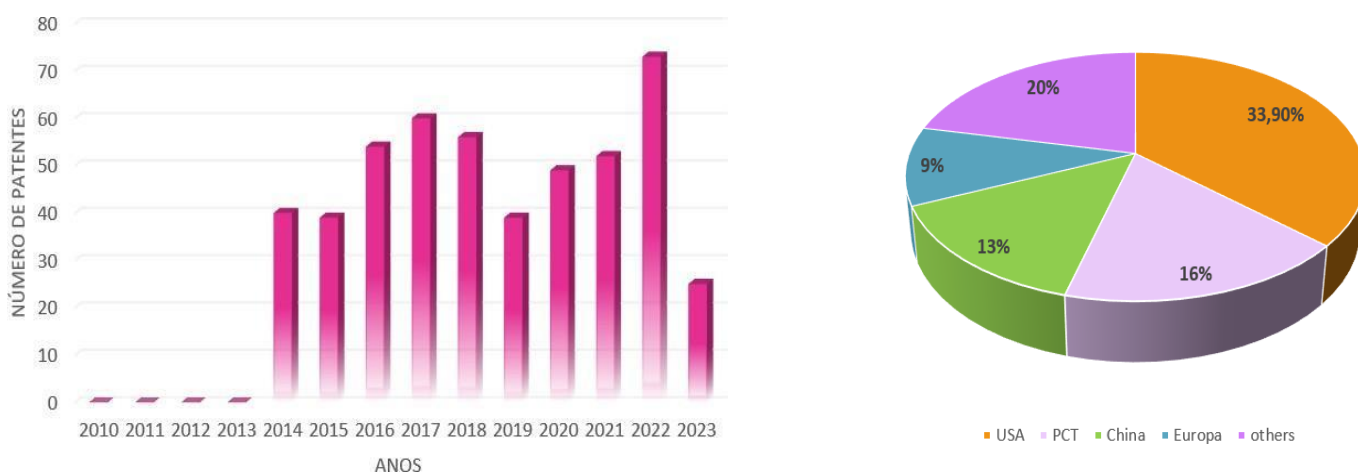
O hidrogênio é uma alternativa promissora aos combustíveis fósseis e é amplamente utilizado em indústrias de processo. A indústria de transportes está se preparando para o uso de células de combustível, onde o hidrogênio, como combustível, desempenha um papel importante. Independentemente da aplicação/setor, o manuseio e o armazenamento seguros de hidrogênio são cruciais (Meda EUA et.al, 2023).

A escolha da melhor tecnologia para a armazenagem depende do tipo de aplicação e do contexto específico de cada situação. Diversas maneiras já se apresentaram viáveis tecnicamente para armazenar o hidrogênio, mas poucas são as opções que atingiram maturidade técnica e, conseqüentemente, maturidade comercial para utilização em grande escala. Como isso, a necessidade de se haver direitos exclusivos concedidos a inventores ou titulares de uma invenção para proteger sua propriedade intelectual (USPTO, 2023).

No armazenamento de hidrogênio, as patentes podem abranger uma ampla gama de tecnologias, como métodos de armazenamento, materiais de armazenamento, dispositivos de armazenamento, sistemas de armazenamento, entre outros, European Patent Office (EPO), fundado em 1994-2023, tem um volume de 1,302 patentes relacionados ao armazenamento de hidrogênio. Nos últimos 10 anos 1,213 patentes foram concedidas, representando 93% das patentes.

A **figura 16** apresenta dados relevantes, mostrando o crescimento anual no volume das patentes.

Também foram mencionados alguns dos países com maior número de patentes. Os Estados Unidos lideram o ranking com 33,9% de patentes depositadas, na sequência podemos ver PCT (Tratado de Cooperação em Matéria de Patentes) com 16% das patentes e em terceiro, temos a China com 13%



Fonte: A autora (2023)

A maioria das opções ainda se encontra em fase de estudos e desenvolvimento. O espaço para progressos, no entanto, é imenso. É importante salientar que uma determinada aplicação do hidrogênio pode influenciar regionalmente no método de armazenagem, de modo a se atingir economia de escala.

6. CONCLUSÃO

O hidrogênio e os seus métodos de armazenamentos mostram diversas aplicações e um interesse crescente nessa área. Com essa análise bibliométrica, podemos ver a cooperação entre países, autores, periódicos e instituições crescendo e se desenvolvendo mais, tanto pelo número de publicações e citações, assim como pelo alto impacto causado e citações crescentes. As principais áreas em que os artigos relacionados ao armazenamento de hidrogênio são os métodos convencionais de armazenamento de hidrogênio e cobre amplamente novas tecnologias, que vão desde meios físicos envolvendo adsorventes sólidos, até materiais químicos, incluindo hidreto metálico, borano de amônia e precursores líquidos, como álcoois e ácido fórmico.

De uma forma geral, o armazenamento de hidrogênio apresenta uma série de vantagens e desvantagens. Por um lado, o hidrogênio possui alta densidade energética, versatilidade de uso em diferentes setores, baixa emissão de poluentes e potencial para integração com energias renováveis. Além disso, o hidrogênio pode ser armazenado a longo prazo, o que é importante para sistemas de energia intermitentes. No entanto, existem desafios a serem superados, como a baixa densidade de armazenamento, questões de segurança, infraestrutura limitada, custos de produção e eficiência energética.

Em conclusão, o armazenamento de hidrogênio tem potencial como uma solução energética sustentável, mas ainda enfrenta obstáculos técnicos, econômicos e de infraestrutura. Mais pesquisas e desenvolvimento são necessários para melhorar a eficiência, reduzir os custos e estabelecer uma infraestrutura robusta para o uso generalizado do hidrogênio como uma opção de armazenamento e transporte de energia.

REFERÊNCIAS

ANDRUSENKO, Iryna et al. **Análise da estrutura de nanobastões de titanato por tomografia automatizada por difração de elétrons**. Acta Crystallographica Seção B: Ciência Estrutural, v. 67, n. 3, p. 218-225, 2011.

ARAÚJO, R.; ALVARENGA, L. **Bibliometrics in Brazilian postgraduate scientific research from 1987 to 2007**. In: Bibli Meetings: Revista Eletrônica de Biblioteconomia e Ciência da Informação. 2011. p. 51-70.

ARIA, Massimo; CUCCURULLO, Corrado. **bibliometrix: An R-tool for comprehensive science mapping analysis**. Journal of informetrics, v. 11, n. 4, p. 959-975, 2017.

ARMAROLI, Nicola; BALZANI, Vincenzo. **The future of energy supply: challenges and opportunities**. Angewandte Chemie International Edition, v. 46, n. 1-2, p. 52-66, 2007.

BARBIR, Frano. **International association for hydrogen energy**. In: Handbook of Transnational Economic Governance Regimes. Brill Nijhoff, 2010. p. 915-921.

BONDARENKO, V. L. et al. **Hydrogen storage**. Chemical and Petroleum Engineering, v. 57, n. 11-12, p. 1026-1032, 2022.

CHEN, Chaomei. **Searching for intellectual turning points: Progressive knowledge domain visualization**. Proceedings of the National Academy of Sciences, v. 101, n. suppl_1, p. 5303-5310, 2004.

DALEBROOK, Andrew F. et al. **Hydrogen storage: beyond conventional methods**. Chemical communications, v. 49, n. 78, p. 8735-8751, 2013.

DE CASTRO, Nivalde. **Economia de hidrogenio**. Rio de janeiro: E-pepers ,2023 pag.7

DE OLIVEIRA PAULA, Fábio; DE PARIS CALDAS, Luiz Fernando; DA SILVA, Jorge Ferreira. Um Estudo Bibliométrico sobre Alianças, Inovação e Desempenho. **Revista de Administração FACES Journal**, 2016.

Department of Natural Gas Conversion, Gas Research Division, Research Institute of Petroleum Industry (RIPI), Olyempic Bolevar, Azadi Sport Complex, Tehran 14665-1998

European patent office. **Espacenet advanced search**. Available: http://worldwide.espacenet.com/advancedSearch?locale=en_EP. Access in april 2023.

GÜR, Turgut M. **Revisão de tecnologias, materiais e sistemas de armazenamento de energia elétrica: desafios e perspectivas para o armazenamento em rede em larga escala**. Ciência Ambiental, v. 11, n. 10, p. 2696-2767, 2018.

International Association for Hydrogen Energy (IAHE). **Hydrogen Storage Technology: Materials, Systems, and Applications** (2015).

JIANG, Zhipeng et al. Fullerenes for rechargeable battery applications: Recent developments

and future perspectives. **Journal of Energy Chemistry**, v. 55, p. 70-79, 2021.

Liu, D., Yu, Q., Sun, T., & Zhang, Y. **Methods of hydrogen storage for subsequent fuel cell applications**. International Journal of Energy Research (2017).

M. Ranjbari, Z. Shams Esfandabadi, F. Quattraro, H. Vatanparast, S.S. Lam, M. Aghbashlo, M. Tabatabaei, **Biomass and organic waste potentials towards implementing circular bioeconomy platforms: A systematic bibliometric analysis**, Fuel. 318 (2022).

M.B. Sales, P.T. Borges, M.N. Ribeiro Filho, L.R. Miranda da Silva, A.P. Castro, A.A. Sanders Lopes, R.K. Chaves de Lima, M.A. de Sousa Rios, J.C.S. dos Santos, Sustainable Feedstocks and Challenges in Biodiesel Production: **An Advanced Bibliometric Analysis, Bioengineering, Bioengineering**. (2022).

MANE, Rasika Bharat; JEON, Yukwon; RODE, Chandrashekhar V. **Uma revisão sobre catalisadores de metais não nobres para hidroxigenação de glicerol para 1,2-propanodiol com e sem hidrogênio externo**. Química Verde, 2022.

MEDA, Ujwal Shreenag et al. **Challenges associated with hydrogen storage systems due to the hydrogen embrittlement of high strength steels**. International Journal of Hydrogen Energy, 2023.

MEDA, Ujwal Shreenag et al. Challenges associated with hydrogen storage systems due to the hydrogen embrittlement of high strength steels. **International Journal of Hydrogen Energy**, 2023.

MEHMOOD, Ayaz; ZUNAID, Mohammad; MADAN, Ashok Kumar. **A bibliometric analysis of cold spray coating process using VOSviewer**. Materials Today: Proceedings, 2022.

NIAZ, Saba; MANZOOR, Taniya; PANDITH, Altaf Hussain. Hydrogen storage: Materials, methods and perspectives. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 50, p. 457-469, 2015.

PANELLA, Bárbara; SILVA, Marcelo; ROTH, Siegmund. **Adsorção de hidrogênio em diferentes nanoestruturas de carbono**. Carbono, v. 43, n. 10, p. 2209-2214, 2005.

(Paleo) estudos glaciares na Patagônia nas últimas décadas (1976-2020): Uma perspectiva bibliométrica baseada na Web of Science. Revista Sul-Americana de Ciências da Terra, p. 104173, 2022.

RAPPAPORT, Theodore S.; MURDOCK, James N.; GUTIERREZ, Felix. State of the art in 60-GHz **integrated circuits and systems for wireless communications**. Proceedings of the IEEE, v. 99, n. 8, p. 1390-1436, 2011

SCHLAPBACH, Louis; ZÜTTEL, Andreas. Hydrogen-storage materials for mobile applications. **nature**, v. 414, n. 6861, p. 353-358, 2001.

SHOME, Samik et al. Impact investment for sustainable development: A bibliometric

analysis. **International Review of Economics & Finance**, v. 84, p. 770-800, 2023.

WIJAYANTA, Agung Tri et al. Liquid hydrogen, methylcyclohexane, and ammonia as potential hydrogen storage: Comparison review. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 44, n. 29, p. 15026-15044, 2019.

WIPO - Search international and national patent collections. Available: <http://wipo.int/patentscope/search/en/search.jsf>. Access in april 2023.

YANG, Jun et al. Materiais de armazenamento de hidrogênio de alta capacidade: atributos para aplicações automotivas e técnicas para descoberta de materiais. **Revisões da Sociedade Química**, v. 39, n. 2, p. 656-675, 2010.

Yang, R. T. **Hydrogen storage by carbon materials**. **Materials Today**, 6(6), 32-38, 2003

Züttel, A. **Materials for hydrogen storage**. **Materials Today**, 6(9), 24-33, 2003.

ZHENG, Kai et al. Large eddy simulation of premixed hydrogen/methane/air flame propagation in a closed duct. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 43, n. 7, p. 3871-3884, 2018.

Züttel, A., Remhof, A., Borgschulte, A., Friedrichs, O., & Bowman Jr, R. C. **Hydrogen storage materials for mobile applications**, 2015