



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

**VANESSA RUTE ZAVALA**

**ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA SOBRE ARMAZENAMENTO DE HIDROGÊNIO  
VERDE: OPORTUNIDADES E DESAFIOS**

**REDENÇÃO – CE**

**2024**

**VANESSA RUTE ZAVALA**

**ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA SOBRE ARMAZENAMENTO DE HIDROGÊNIO  
VERDE: OPORTUNIDADES E DESAFIOS**

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

2024

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

---

Zavala, Vanessa Rute.

Z39a

Análise bibliométrica sobre armazenamento de hidrogênio verde /  
Vanessa Rute Zavala. - Redenção, 2024.

60fl: il.

Outro - Curso de Engenharia de Energias, Instituto de  
Engenharias e Desenvolvimento Sustentável, Universidade da  
Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira, Redenção,  
2024.

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

1. Análise bibliométrica. 2. Armazenamento. 3. Energia. I.  
Título

CE/UF/BSCA

CDD 621.3121

---

## DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho às almas gentis que cruzaram meu caminho e me ensinaram lições que vão além do conhecimento acadêmico. Vocês me mostraram a força da empatia, humildade e o mais importante, o poder do amor ao próximo e o valor de cada pequena gentileza.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por ter me dado forças e luz ao longo desta caminhada. Em meio a todos os desafios, tanto acadêmicos quanto pessoais, sua presença me deu coragem para seguir em frente, mantendo-me firme nos momentos mais difíceis e nunca permitindo que eu desistisse do meu sonho.

Aos meus pais, Alexandre Zavala e Raquelina Siteo, minha eterna gratidão. Se não fosse por vocês, eu não teria chegado tão longe. Meu pai, em especial, é a maior inspiração da minha vida, um exemplo de dedicação e perseverança que me impulsionou até este momento. Agradeço por acreditarem no meu potencial, pelo apoio incondicional e por me lembrarem constantemente que sou capaz de alcançar grandes coisas.

À minha irmã, Nádia Zavala, agradeço por ser a pessoa que sempre acreditou em mim e me incentivou a não desistir, mesmo quando os pensamentos de desânimo surgiam. Suas palavras de encorajamento e confiança sempre trouxeram força ao meu coração, e em cada momento de incerteza ela esteve ao meu lado, lembrando-me da minha capacidade e determinação.

A minha amiga e companheira de jornada, Shénia Passos, sou imensamente grata. Mesmo nas fases mais desafiadoras, quando as batalhas diárias pareciam insuportáveis, ela estava lá, lembrando-me que dias ruins são passageiros e que, ao final, dias melhores certamente virão. Sua amizade e apoio foram essenciais para que eu mantivesse o foco e continuasse perseverando.

Gostaria de expressar minha sincera gratidão ao meu orientador, Professor Jose Cleiton, e à minha coorientadora Dayana Dari por todo o apoio, orientação e dedicação ao longo desta caminhada. Aos meus professores, que tanto contribuíram para minha formação acadêmica e pessoal, deixo meu sincero agradecimento. Aos amigos que fiz durante o curso, agradeço pelo companheirismo, pelo apoio mútuo e pelas tantas horas de estudo, discussões e risadas. Foi ao lado de vocês que aprendi o verdadeiro valor da cooperação, elementos que tornaram esta jornada mais leve e significativa.

A todos vocês, minha mais profunda gratidão. Esta conquista é de alguma forma, resultado da força e inspiração que cada um de vocês representou em minha vida.

“Não são as espécies mais fortes que sobrevivem nem as mais inteligentes, e sim as mais suscetíveis a mudanças.”

Charles Darwin

## RESUMO

O hidrogênio verde é visto como um vetor promissor de produção e armazenamento de energia limpa e renovável com tecnologias promissoras para atender as demandas energéticas e de processos produtivos de diversos setores da economia. O hidrogênio é o elemento químico mais abundante da superfície terrestre e encontra-se normalmente associado a compostos orgânicos como hidrocarbonetos, além disso, se encontra formando as moléculas de água. Os avanços tecnológicos no campo do armazenamento de hidrogênio têm se mostrado fundamentais para a viabilização do hidrogênio verde como uma alternativa energética segura e eficiente. Atualmente as principais tecnologias de armazenamento existentes são: hidrogênio líquido (LH<sub>2</sub>) em tanques criogênicos, no estado sólido, por adsorção em 25 hidretos metálicos, armazenamento geológico, e o mais comum, o armazenamento na forma de gás comprimido (CGH<sub>2</sub>) em vasos de pressão. O artigo realiza uma análise bibliométrica abrangente sobre o armazenamento de hidrogênio verde, destacando as principais tendências, desafios e oportunidades no campo. Utilizando ferramentas como Citespace e VOSviewer, foram analisados mais de 42218 artigos publicados entre 2014 e 2024, revelando um crescimento significativo nas pesquisas sobre hidrogênio verde, impulsionado pelo aumento das políticas ambientais e pelo avanço tecnológico. O estudo mapeia as redes de colaboração entre países, instituições e autores, evidenciando a liderança da China e dos Estados Unidos, e destaca os periódicos mais influentes, como o *International Journal of Hydrogen Energy*. As descobertas apontam que o hidrogênio verde desempenha um papel central na transição para uma economia de baixo carbono, sendo uma alternativa viável aos combustíveis fósseis para o armazenamento de energia. Diversas tecnologias de armazenamento foram discutidas, cada uma com suas vantagens e limitações. As colaborações internacionais e os avanços em materiais inovadores, como os nanomateriais, são fundamentais para superar os desafios técnicos e viabilizar o hidrogênio verde como uma solução sustentável no setor energético. Em conclusão, este estudo reforça a importância do armazenamento de hidrogênio verde para o desenvolvimento de uma matriz energética sustentável e evidencia a necessidade de investimentos contínuos em pesquisa e desenvolvimento.

**Palavras-Chave:** Análise bibliométrica. Armazenamento. Energia. Hidrogênio verde.

## ABSTRACT

Green hydrogen is seen as a promising vector for the production and storage of clean and renewable energy with promising technologies to meet the energy demands and production processes of various sectors of the economy. Hydrogen is the most abundant chemical element on the Earth's surface and is normally associated with organic compounds such as hydrocarbons, in addition, it is found forming water molecules. Technological advances in the field of hydrogen storage have proven to be fundamental for the feasibility of green hydrogen as a safe and efficient energy alternative. Currently, the main existing storage technologies are: liquid hydrogen (LH<sub>2</sub>) in cryogenic tanks, in solid state, by adsorption in 25 metal hydrides, geological storage, and the most common, storage in the form of compressed gas (CGH<sub>2</sub>) in pressure vessels. The article conducts a comprehensive bibliometric analysis on green hydrogen storage, highlighting the main trends, challenges, and opportunities in the field. Using tools such as Citespace and VOSviewer, more than 42218 articles published between 2014 and 2024 were analyzed, revealing a significant growth in research on green hydrogen, driven by the increase in environmental policies and technological advancement. The study maps the collaboration networks between countries, institutions, and authors, highlighting the leadership of China and the United States, and highlights the most influential journals, such as the International Journal of Hydrogen Energy. The findings point out that green hydrogen plays a central role in the transition to a low-carbon economy, being a viable alternative to fossil fuels for energy storage. Several storage technologies were discussed, each with its advantages and limitations. International collaborations and advances in innovative materials, such as nanomaterials, are key to overcoming technical challenges and enabling green hydrogen as a sustainable solution in the energy sector. In conclusion, this study reinforces the importance of green hydrogen storage for the development of a sustainable energy matrix and highlights the need for continuous investments in research and development.

**Keywords:** Bibliometric analysis. Storage. Energy. Green hydrogen.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Fluxograma da metodologia aplicada para a pesquisa sobre armazenamento de hidrogênio verde. ....	19
Figura 2-Distribuição anual do número de publicações e citações sobre armazenamento de Hidrogênio Verde (base de dados selecionada e exportada em 05 de setembro 2024).....	21
Figura 3- Rede de citações entre os periódicos mais citados sobre Armazenamento de Hidrogênio Verde (2014-2024). ....	23
Figura 4-Rede de citações entre os países mais citados em pesquisas sobre Armazenamento de Hidrogênio Verde, imagem gerada usando o software Citespace (2014-2024). ....	25
Figura 5-Rede de citações entre os países mais citados em pesquisas sobre Armazenamento de Hidrogênio Verde, imagem gerada usando o software Vosviewer (2014-2024). ....	25
Figura 6-Rede de impacto e colaboração entre as organizações mais proeminentes em Armazenamento de Hidrogênio Verde (2014-2024). ....	27
Figura 7- Rede de citações entre os autores mais citados em pesquisas sobre Armazenamento de Hidrogênio Verde (2014-2024), analisada com o vosviewer ....	28
Figura 8-Fluxograma com o número e áreas que mais pesquisaram sobre armazenamento de hidrogênio verde. ....	35
Figura 9-Evolução das palavras-chave: uma abordagem de análise com Citespace. ....	37
Figura 10-Evolução das palavras-chave: uma abordagem de análise com Vosviewer. ....	37
Figura 11-Classificação dos tipos de armazenamento de hidrogênio verde. ....	42
Figura 12-Principais matérias-primas para dessorção química no armazenamento de hidrogênio. ....	45
Figura 13-Principais materiais para dessorção física no armazenamento de hidrogênio. ....	46

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Principais periódicos, países, instituições e autores em publicações sobre armazenamento de hidrogênio verde (2014-2024).....	31
Tabela 2-Artigos mais citados sobre armazenamento de Hidrogênio Verde nos últimos 10 anos.....	32
Tabela 3-Palavras-chave no estudo sobre armazenamento de hidrogênio verde: Um ranking das principais tendências de pesquisa.....	39

## **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
P&D	Pesquisa e desenvolvimento

## Sumário

1	Introdução .....	14
2	Objetivos e justificativa .....	15
2.1	Objetivo geral.....	15
2.2	Objetivos específicos.....	15
2.3	Justificativa.....	16
3	Revisão bibliográfica .....	16
3.1	Aplicações e classificações do hidrogênio .....	16
3.2	Armazenamento de hidrogênio verde .....	17
3.3	Avaliação da produtividade científica .....	17
3.4	Impacto da pesquisa e desenvolvimento em políticas energéticas.....	17
3.5	A integração do hidrogênio verde nas políticas energéticas.....	18
4	Metodologia.....	18
4.1	Coletas de dados .....	18
4.2	Visualização dos dados .....	19
5	Resultados e discussão .....	20
5.1	Análise bibliométrica das publicações e citações sobre armazenamento de hidrogênio verde nos últimos 10 anos (2014 a 2024). .....	20
5.2	Estudos periódicos, países, instituições e autores.....	22
5.3	Rede de colaboração entre os periódicos mais citados .....	22
5.4	Rede de citações entre os países mais citados em pesquisas sobre Armazenamento de Hidrogênio Verde (2014-2024).....	24
5.5	Rede de impacto e colaboração entre as organizações mais proeminentes em Armazenamento de Hidrogênio Verde (2014-2024).....	26
5.6	Rede de citações entre os autores mais citados em pesquisas sobre Armazenamento de Hidrogênio Verde (2014-2024).....	28
6	Relação entre periódicos, países e autores principais na elaboração de pesquisas sobre Armazenamento de Hidrogênio Verde (2014-2024) .....	29
7	Análise bibliométrica dos principais artigos científicos mais citados sobre armazenamento de hidrogênio verde. ....	32
8	Áreas de pesquisa sobre armazenamento de hidrogênio verde .....	35
8.1	Análise da rede de palavras-chave em armazenamento de hidrogênio verde: Uma perspectiva de pesquisa dos últimos 10 anos.....	36
8.2	Análise das palavras-chave no estudo sobre armazenamento de hidrogênio verde: Um ranking das principais tendências de pesquisa .....	38
9	Conceitos de energias renováveis e hidrogênio verde .....	40

9.1	Importância econômica do hidrogênio verde.....	41
9.2	Avanços tecnológicos e materiais para armazenamento de hidrogênio.....	42
9.3	Vantagens e desvantagens no armazenamento de hidrogênio verde .....	47
9.4	Inovações em armazenamento.....	48
9.5	Aumentando a densidade energética .....	48
10	Desafios e oportunidades na infraestrutura de armazenamento e transporte de hidrogênio verde .....	49
10.1	Desafios técnicos .....	49
10.2	Oportunidades de inovação .....	49
10.3	Necessidade de investimentos .....	50
11	Desafios e perspectivas futuras.....	50
11.1	Hidrogênio verde como vetor da economia de baixo carbono.....	50
11.2	Geração de empregos e atração de investimentos .....	51
11.3	Integração nas redes de energia .....	51
11.4	Impacto da pesquisa e desenvolvimento em políticas energéticas.....	52
11.5	A integração do hidrogênio verde nas políticas energéticas.....	52
11.6	Papel da pesquisa e desenvolvimento .....	52
11.7	Desafios na implementação de políticas .....	53
12	Conclusão .....	54
	Referências .....	55

## 1 Introdução

Com a crescente demanda por energia elétrica aliada à necessidade de redução do impacto ao meio ambiente, há uma demanda cada vez maior pelo uso de fontes de energia renováveis. Cada quilograma de hidrogênio contém aproximadamente 2,4 vezes mais energia do que o gás natural e produz zero emissões de gases de efeito estufa (MUELLER DE LARA et al. 2023). O hidrogênio verde é aquele produzido a partir de energias renováveis como, por exemplo, através da energia solar ou eólica, sem liberação de CO<sub>2</sub>. A ciência e demais especialistas estão convencidos de que o hidrogênio verde, produzido de forma neutra para o clima, pode levar a contribuições decisivas para a redução de CO<sub>2</sub> em muitos setores industriais (MUELLER DE LARA et al. 2023).

O hidrogênio (H<sub>2</sub>) tem o potencial de produzir energia, gerar e distribuir calor e potência com pequeno impacto ambiental, pois na sua combustão tem como subproduto apenas água. O H<sub>2</sub> pode ser produzido a partir de diferentes matérias-primas, e os processos utilizados na sua obtenção são divididos principalmente em: produção a partir de combustíveis fósseis e produção a partir de fontes renováveis (RAMOS et al., 2022). O armazenamento de hidrogênio verde é uma etapa crucial para garantir sua viabilidade como fonte energética, permitindo que ele seja transportado e utilizado em momentos e locais de maior necessidade. Entre os principais tipos de armazenamento estão o hidrogênio em estado gasoso, líquido e sólido, cada qual com suas vantagens e desafios (DUTTA, 2014). O armazenamento gasoso em tanques de alta pressão, por exemplo, é amplamente utilizado devido à sua simplicidade, mas apresenta problemas de eficiência volumétrica e segurança (Züttel et al., 2003). Já o armazenamento em estado sólido, como em hidretos metálicos, permite alta densidade volumétrica, mas é limitado pelo peso e pela capacidade gravimétrica, o que torna essa opção menos viável para algumas aplicações, como no transporte (Niaz, 2015).

A popularidade do hidrogênio verde e seus desafios tecnológicos têm fomentado uma proliferação de pesquisas, refletida no aumento significativo de publicações científicas sobre o tema na última década. Para avaliar o progresso e o impacto dessas pesquisas, este estudo utiliza uma abordagem bibliométrica baseada em dados da Web of Science (WoS), analisados com ferramentas como o VOSviewer e o Citespace.

De acordo com Pereira et al. (2024), a análise bibliométrica é essencial para entender não só a quantidade, mas também a qualidade das contribuições acadêmicas, permitindo

identificar as regiões e instituições mais envolvidas no avanço das tecnologias de hidrogênio verde. Estudos anteriores, como os de Nikolaidis e Poullikkas (2017), evidenciam que a China e os Estados Unidos lideram em número de publicações e colaborações internacionais, refletindo o papel central desses países no desenvolvimento de inovações e soluções tecnológicas. Assim, o objetivo deste trabalho é apresentar uma visão ampla sobre as pesquisas em armazenamento de hidrogênio verde, identificando as principais tendências, tópicos mais explorados e os desafios e oportunidades para futuras investigações. Ao mapear os principais centros de pesquisa e as redes de colaboração que impulsionam o tema, o estudo contribui para uma compreensão mais profunda do papel do hidrogênio verde na transição energética e para a definição de diretrizes estratégicas que visem à sustentabilidade energética global.

Este trabalho procura responder a perguntas essenciais que orientam o desenvolvimento sobre armazenamento de hidrogênio verde.

RQ1- Quais tecnologias de armazenamento de hidrogênio verde estão mais avançadas?

RQ2- Como as redes de colaboração internacional contribuem para o avanço das pesquisas sobre esse tema?

RQ3- Como o hidrogênio verde pode se tornar um pilar para a descarbonização e a segurança energética global?

## **2 Objetivos e justificativa**

### **2.1 Objetivo geral**

- ❖ Analisar por meio de uma pesquisa bibliométrica a produção científica sobre armazenamento de hidrogênio verde, avaliando tendências, tópicos de interesse e os principais desafios e oportunidades para pesquisas futuras.

### **2.2 Objetivos específicos**

- ❖ Analisar as redes de colaboração entre países, instituições e autores para entender as principais contribuições no campo.
- ❖ Identificar as tecnologias de armazenamento mais exploradas e suas vantagens e limitações.
- ❖ Destacar as principais tendências e tópicos emergentes na pesquisa sobre hidrogênio verde, com base nas palavras-chave mais recorrentes e nas citações.

- ❖ Avaliar o impacto das políticas energéticas e de sustentabilidade sobre o crescimento da pesquisa em hidrogênio verde.

### 2.3 Justificativa

O presente trabalho justifica-se pela necessidade de superar desafios técnicos e econômicos que ainda limitam a expansão do hidrogênio verde como uma solução prática e acessível. A pesquisa detalhada sobre materiais inovadores, como nanomateriais, para o armazenamento de hidrogênio pode abrir caminhos para novas tecnologias mais eficientes e seguras.

Compreender os obstáculos e oportunidades no campo do hidrogênio verde auxilia a identificar as estratégias necessárias para reduzir custos e tornar o armazenamento mais competitivo. Com isso, este trabalho busca não apenas expandir o conhecimento científico, mas também fornece uma base sólida para o desenvolvimento de soluções sustentáveis, colaborando para a construção de uma matriz energética limpa e para a mitigação das mudanças climáticas.

## 3 Revisão bibliográfica

### 3.1 Aplicações e classificações do hidrogênio

O hidrogênio molecular (H<sub>2</sub>) se destaca como combustível devido à sua capacidade de armazenamento a longo prazo e alta densidade gravimétrica de energia (140 MJ kg<sup>-1</sup>), podendo ser empregado em aplicações estacionárias, mobilidade, assim como para o armazenamento e transporte de energia. O H<sub>2</sub> recebe designações conforme a sua origem (FERREIRA GAMBA, 2024).

As principais classificações do hidrogênio são: hidrogênio verde (obtido a partir do uso de energias renováveis, como eólica, solar, reforma do biogás), hidrogênio cinza (da reforma de metano oriundo de gás natural, biomassa e gaseificação do carvão), hidrogênio azul (oriundo da reforma de metano oriundo de gás natural, biomassa e gaseificação do carvão com processo de captura de carbono) (FERREIRA GAMBA, 2024) .

O hidrogênio pode ser usado diretamente como transportador de energia final ou pode ser posteriormente convertido em metano, gás de síntese, combustíveis líquidos, eletricidade ou produtos químicos como, por exemplo, amônia ou metanol, por sua vez, hidrogênio verde pode aquecer fornos industriais, tais como nas indústrias de vidro, cimento ou de aço (MUELLER DE LARA et al. 2023).

### **3.2 Armazenamento de hidrogênio verde**

O armazenamento de hidrogênio verde tem ganhado destaque na pesquisa científica como uma tecnologia essencial para a transição para fontes de energia mais sustentáveis. A literatura sobre o tema reflete o caráter multidisciplinar dessa área, abordando desde princípios fundamentais e processos de produção até desafios técnicos de armazenamento e transporte. A seguir, são apresentados os principais temas e tendências identificadas nos estudos com base na análise de diferentes áreas de pesquisa.

### **3.3 Avaliação da produtividade científica**

A análise bibliométrica avançada ajuda a entender e obter parâmetros que integram o cenário atual de pesquisa dentro de um campo específico, diferenciando-se das revisões bibliográficas usuais (CAVALCANTE et al., 2023). Glänzel (2003) enfatiza a importância da bibliometria como um recurso para avaliar a produtividade científica. Essa abordagem quantitativa analisa publicações acadêmicas, citações e outros indicadores relacionados para avaliar o desempenho de autores, instituições e países. No campo do hidrogênio verde, essa análise permite identificar quais pesquisadores e grupos estão na vanguarda da inovação e quais instituições estão contribuindo significativamente para o avanço do conhecimento.

Por exemplo, estudos bibliométricos podem revelar quais universidades ou centros de pesquisa estão publicando com mais frequência em periódicos de alto impacto, indicando um compromisso com a pesquisa de qualidade e uma influência significativa no campo. Esses dados não apenas ajudam a reconhecer os líderes na pesquisa em hidrogênio verde, mas também podem guiar decisões sobre financiamentos e colaborações.

### **3.4 Impacto da pesquisa e desenvolvimento em políticas energéticas**

O avanço nas tecnologias de hidrogênio verde representa uma oportunidade significativa para transformar as políticas energéticas globais, especialmente em relação à redução das emissões de carbono e à promoção de uma economia de baixo carbono. A pesquisa e desenvolvimento (P&D) nesta área não apenas impulsionam inovações tecnológicas, mas também influenciam a formulação de políticas públicas que buscam garantir uma transição energética sustentável.

### 3.5 A integração do hidrogênio verde nas políticas energéticas

Sherif et al. (2020) destacam que a integração do hidrogênio verde nas estratégias energéticas é fundamental para mitigar as mudanças climáticas. A crescente evidência científica do impacto das emissões de gases de efeito estufa (GEE) tem levado governos e organizações internacionais a repensarem suas políticas energéticas. Nesse contexto, o hidrogênio verde emerge como uma solução viável, sendo produzido a partir de fontes renováveis, como a energia solar e eólica e através do processo de eletrólise.

O desenvolvimento de políticas que incentivem a produção e utilização do hidrogênio verde pode ajudar a diversificar as fontes de energia, reduzindo a dependência de combustíveis fósseis e, conseqüentemente, as emissões de carbono. Além disso, a adoção do hidrogênio como vetor energético permite a armazenagem de energia e o transporte de energia renovável de forma mais eficiente, contribuindo para a estabilidade das redes elétricas.

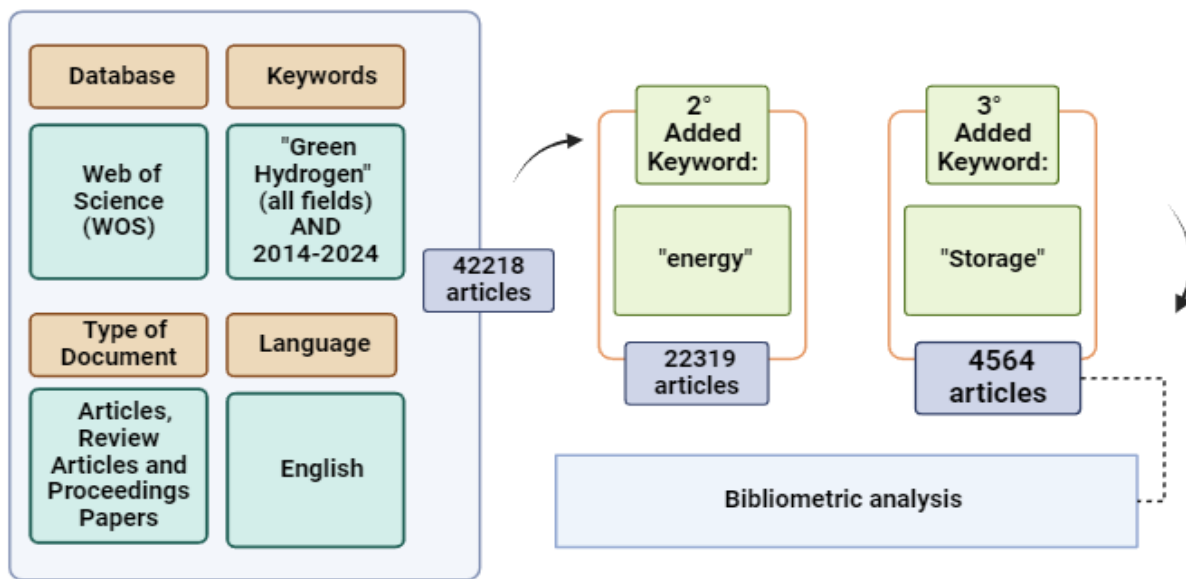
## 4 Metodologia

### 4.1 Coletas de dados

O presente estudo é baseado em estudos anteriores (DARI et al., 2024) (DE CASTRO BIZERRA et al., 2024) (CAVALCANTE et al., 2023). Os dados para a análise bibliométrica foram coletados da base Web of Science (WoS) (<https://www.webofscience.com>), sendo acessados em 05 de setembro de 2024.

A seleção da base de dados na *WoS* começou com a busca inicial no campo “todos os campos” com a palavra-chave *Green Hydrogen*, definindo o período de análises de 2014 a 2024, o que retornou um total de 42.218 artigos. Os documentos foram selecionados e categorizados como artigos, artigos de revisão e artigos de conferências, tendo inglês como idioma principal. Para refinar mais a pesquisa e focar em tópicos mais específicos dentro da área de armazenamento de hidrogênio verde, foram aplicados dois filtros adicionais de palavras-chave. O primeiro filtro utilizou a palavra *energy*, o que reduziu o número de artigos relevantes para 22.319 artigos. Por fim, um segundo filtro foi aplicado utilizando a palavra *storage*, resultando em um conjunto final de 4.564 artigos, consistindo na base de dados a ser trabalhada. A figura 1 apresenta uma esquematização detalhada das etapas metodológicas seguidas na pesquisa sobre o armazenamento de hidrogênio verde.

Figura 1- Fluxograma da metodologia aplicada para a pesquisa sobre armazenamento de hidrogênio verde.



Fonte: Autora (2024)

## 4.2 Visualização dos dados

Após a seleção e exportação da base de dados, foram utilizadas as ferramentas *Citespace* (versão 5.7. R2) e *VOSviewer* (versão 1.6.20) amplamente reconhecidas na análise de redes de colaboração e citações para mapear a relação entre países, instituições e autores no campo do hidrogênio verde, energia e armazenamento. Essas ferramentas permitiram visualizar e interpretar os dados bibliométricos de forma mais detalhada, revelando padrões e tendências importantes nas redes de coautoria e citações. Além disso, a Microsoft Excel (versão Microsoft 365) foi utilizada para a criação de gráficos complementares e para organização de dados, possibilitando uma representação visual clara dos dados analisados. Dessa forma, o uso combinado dessas ferramentas proporcionou uma abordagem robusta para a análise da pesquisa.

Esses dados foram então submetidos a uma análise bibliométrica detalhada. Esse tipo de análise permitiu a visualização de padrões de colaboração entre países, instituições e autores mais citados na área de armazenamento de hidrogênio verde. Foi possível identificar as publicações e instituições que mais contribuíram para o avanço deste campo de estudo durante o período analisado. O estudo também permitiu identificar as principais tendências de pesquisa e destacar os tópicos mais explorados na literatura científica, auxiliando na definição de uma agenda para futuras investigações. Ao longo da análise, buscou-se entender a distribuição geográfica da produção científica, identificar os países com maior número de publicações e

examinar a colaboração internacional. Também foi investigada a rede de autores e instituições mais influentes, assim como a interligação entre elas, revelando quais são os principais centros de excelência e pesquisa nesse tema emergente. Este estudo bibliométrico, portanto, fornece uma visão abrangente e estratégica sobre o desenvolvimento da pesquisa em hidrogênio verde, energia e armazenamento, destacando os principais protagonistas e temas centrais da área. Dessa forma, o uso combinado dessas ferramentas visa proporcionar uma abordagem mais ampla para a análise bibliométrica, permitindo identificar tendências e destacar postos-chave para o avanço futuro da pesquisa na área.

## **5 Resultados e discussão**

Neste capítulo da monografia, apresentamos e discutimos os dados obtidos na pesquisa sobre o armazenamento de hidrogênio verde.

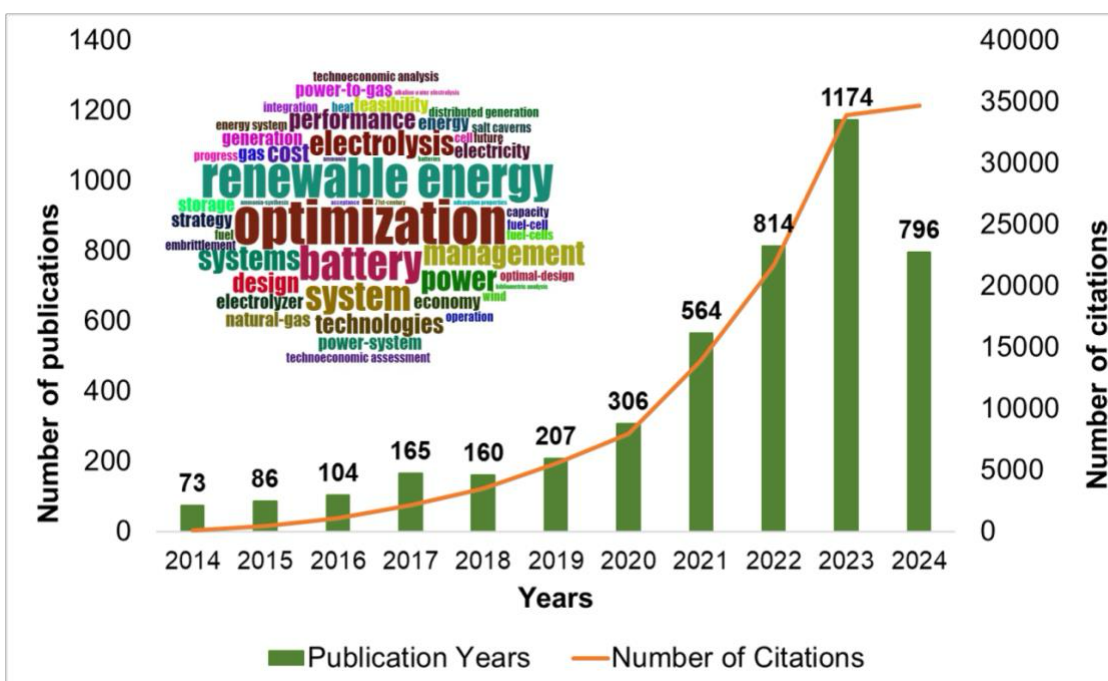
Essa abordagem não apenas enriqueceu a discussão sobre o armazenamento de hidrogênio verde, mas também destacou a importância de um trabalho colaborativo entre os pesquisadores, visto que muitos dos temas emergentes requerem uma interdisciplinaridade que é fundamental para a inovação e a eficácia das soluções propostas. A seguir, apresentamos os resultados das análises realizadas e discutimos suas implicações para o campo do armazenamento de hidrogênio verde.

### **5.1 Análise bibliométrica das publicações e citações sobre armazenamento de hidrogênio verde nos últimos 10 anos (2014 a 2024).**

Nos últimos anos, a comunidade científica tem se dedicado amplamente na busca por alternativas viáveis aos combustíveis fósseis. O enfoque em alternativas energéticas limpas e sustentáveis tem se intensificado, impulsionado pela crescente conscientização acerca dos desafios impostos pelas mudanças climáticas e pela necessidade de reduzir a dependência de fontes de energia não renováveis (RODELLA, 2024). O crescente interesse pela produção, armazenamento e uso do hidrogênio verde, impulsionado por avanços tecnológicos e pela implementação de políticas ambientais globais, tem refletido diretamente no aumento significativo de publicações acadêmicas e citações relacionadas ao tema. Nesse contexto, o armazenamento de hidrogênio verde surge como um dos principais desafios tecnológicos, uma vez que sua viabilidade é essencial para a integração eficiente dessa fonte de energia limpa nas redes energéticas e industriais (KOVÁČ; PARANOS; MARCIUŠ, 2021).

Este trabalho realiza uma análise bibliométrica das publicações e citações sobre armazenamento de hidrogênio verde nos últimos 10 anos (2014-2024). A análise tem como base dados coletados em uma pesquisa bibliográfica, considerando a evolução temporal das publicações e das citações, destacando o impacto que esses estudos têm exercido na comunidade científica ao longo do período analisado. A análise do gráfico apresentado ajuda a entender como as pesquisas nessa área evoluíram ao longo dos anos, identificando tendências e possíveis fatores que impulsionaram o interesse pelo tema.

Figura 2-Distribuição anual do número de publicações e citações sobre armazenamento de Hidrogênio Verde (base de dados selecionada e exportada em 05 de setembro 2024)



Fonte: Autora (2024)

A Figura 2 apresenta a distribuição anual do número de publicações e citações sobre o armazenamento de hidrogênio verde entre 2014 e 2024 e revela um crescimento notável na produção acadêmica ao longo do tempo. Nos primeiros anos do período analisado, entre 2014 e 2016, o número de publicações sobre o tema foi relativamente modesto, com poucas citações associadas. Este cenário reflete o estágio inicial das pesquisas sobre armazenamento de hidrogênio verde, em que o foco ainda estava voltado para a exploração de métodos convencionais de produção de hidrogênio. Um exemplo é o artigo de (NIKOLAIDIS; POULLIKKAS, 2017), que forneceu uma visão geral comparativa desses métodos, destacando a escassez de estudos focados no armazenamento. Existem várias tecnologias de produção de hidrogênio a partir de combustíveis fósseis, sendo os principais os hidrocarbonetos

reformadores e pirólise. Esses métodos são os mais desenvolvidos e comumente usados, atendendo quase toda a demanda de hidrogênio. Até o momento, o hidrogênio foi produzido 48% a partir do gás natural, 30% dos óleos pesados e nafta, e 18% de carvão, (NIKOLAIDIS; POULLIKKAS, 2017).

A partir de 2017, observa-se um aumento gradual no número de publicações, com uma aceleração mais significativa a partir de 2019. Em 2023, o número de citações atinge seu pico, com quase 40.000 citações, evidenciando que as pesquisas realizadas nos anos anteriores se tornaram influentes.

No período entre 2020 e 2023, verifica-se um crescimento exponencial no número de publicações, com um pico de 1.174 publicações em 2023. Esse aumento pode estar relacionado a novos avanços tecnológicos e políticas ambientais que impulsionaram a investigação científica nesta área. No entanto, as projeções para 2024 indicam uma leve redução no número de publicações, com 796 artigos previstos. Embora menor em relação ao ano anterior, esse número ainda é substancial, mostrando que o interesse na área continua elevado.

De forma correlata, o número de citações projetado para 2024 também apresenta uma ligeira queda, embora ainda permaneça significativo, com aproximadamente 25.000 citações. Isso sugere que a pesquisa sobre armazenamento de hidrogênio verde continua a ser altamente relevante, refletindo a importância crescente do tema na agenda científica global.

## **5.2 Estudos periódicos, países, instituições e autores**

A análise bibliométrica do armazenamento de hidrogênio verde entre 2014 e 2024 revela um crescimento significativo no número de publicações e citações, refletindo o aumento do interesse científico no tema. Além de observar esse crescimento, é importante destacar os periódicos mais citados, os países líderes em produção científica, os autores de maior influência e as instituições que mais contribuíram para o desenvolvimento do conhecimento sobre o armazenamento de hidrogênio verde.

## **5.3 Rede de colaboração entre os periódicos mais citados**

A Figura 3, construída com o software VOSviewer, detalha a rede de citações entre os periódicos mais citados sobre o armazenamento de hidrogênio verde entre 2014 e 2024. Utilizando parâmetros como cocitações e a força dos links entre periódicos, a figura 3



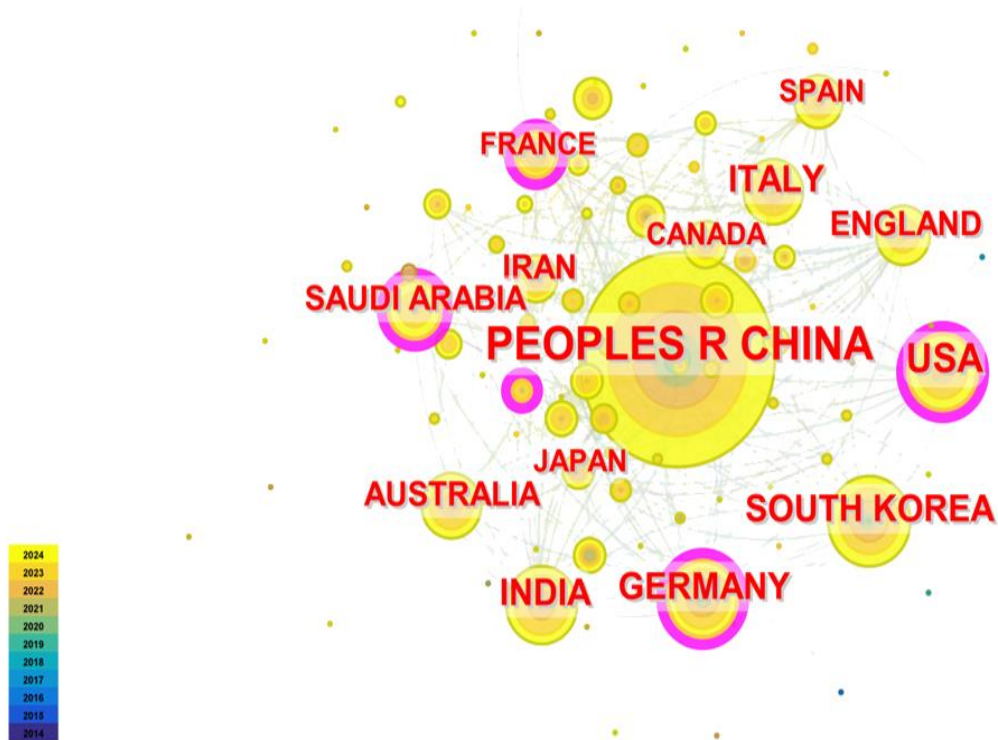
em comum. Esses agrupamentos coloridos representam “clusters” de conhecimento, indicando que os periódicos dentro de cada cluster têm um foco temático semelhante ou uma interdependência maior em termos de citações (WALTMAN; VAN ECK; NOYONS, 2010)

Essa visualização permite observar a importância do *International Journal Hydrogen Energy no avanço* dos estudos sobre armazenamento de hidrogênio verde, enquanto outros periódicos orbitam em torno dele, formando uma rede colaborativa de produção científica. O uso do VOSviewer facilita a identificação dessas relações complexas, permitindo uma leitura clara da influência que cada periódico exerce dentro da rede (RADTKE CANEPPELE et al., 2023).

#### **5.4 Rede de citações entre os países mais citados em pesquisas sobre Armazenamento de Hidrogênio Verde (2014-2024)**

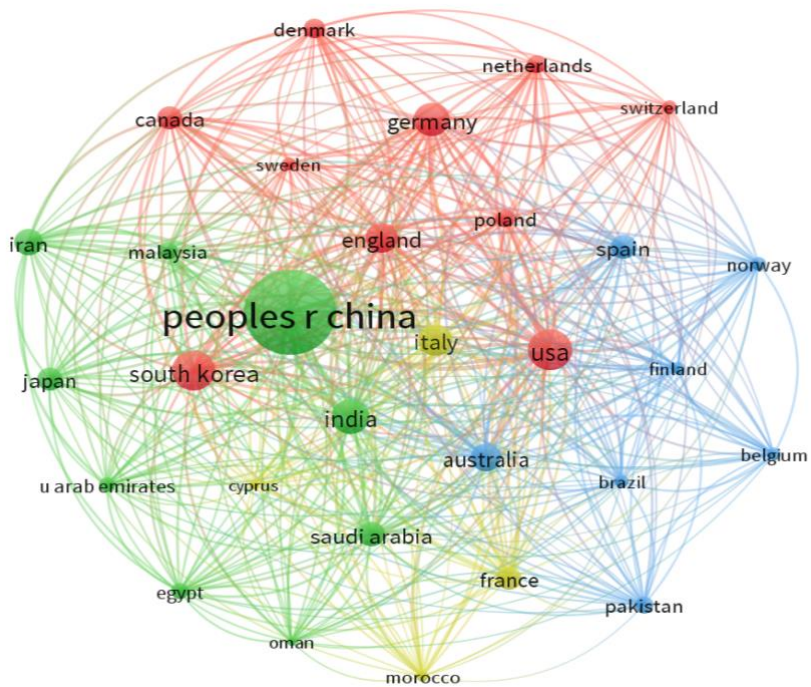
O estudo bibliométrico sobre o armazenamento de hidrogênio verde entre 2014 e 2024 permite analisar a distribuição geográfica do conhecimento científico relacionado a esse tema emergente. Através da rede de citações, é possível identificar os países mais influentes e suas colaborações no desenvolvimento de tecnologias e pesquisas voltadas para o armazenamento de hidrogênio verde. Este mapeamento, gerado pelo software VOSviewer, destaca as interações entre as nações, ressaltando o papel de liderança de países como China e Estados Unidos, e a relevância de colaborações internacionais para o avanço das soluções tecnológicas no setor energético. A visualização da figura 4 e 5 revela uma análise das conexões bibliométricas entre os países que têm maior relevância no campo de estudos sobre o armazenamento de hidrogênio verde.

Figura 4-Rede de citações entre os países mais citados em pesquisas sobre Armazenamento de Hidrogênio Verde, imagem gerada usando o software Citespace (2014-2024).



Fonte: Autora (2024)

Figura 5-Rede de citações entre os países mais citados em pesquisas sobre Armazenamento de Hidrogênio Verde, imagem gerada usando o software Vosviewer (2014-2024).



Fonte: Autora (2024)

No centro da rede, a China, destacada em verde, aparece como o país mais citado, com um papel central no desenvolvimento de pesquisas sobre o armazenamento de hidrogênio verde. A dominância da China pode ser justificada pelo grande volume de investimentos em energias renováveis e pelas inúmeras publicações de altos impactos provenientes de suas instituições de pesquisa (Zhang et al., 2018). Os Estados Unidos, representados em vermelho, aparecem logo em seguida, mostrando também um número significativo de citações e uma forte conexão com outros países. O papel dos Estados Unidos pode ser explicado pelo avanço tecnológico na área de hidrogênio verde e pelas colaborações entre instituições como o *National Renewable Energy Laboratory* (NREL) e universidades renomadas que lideram pesquisas inovadoras (Sherif et al., 2020). Outros países, como Alemanha, Japão e Reino Unido, representados por nós de outras cores, também desempenham papéis importantes, mas em menor escala quando comparados à China e aos Estados Unidos. Esses países apresentam forte tradição em pesquisa sobre energias renováveis, particularmente a Alemanha, que tem um histórico de liderança em políticas públicas voltadas para o desenvolvimento de energias limpas (Ursu et al., 2021).

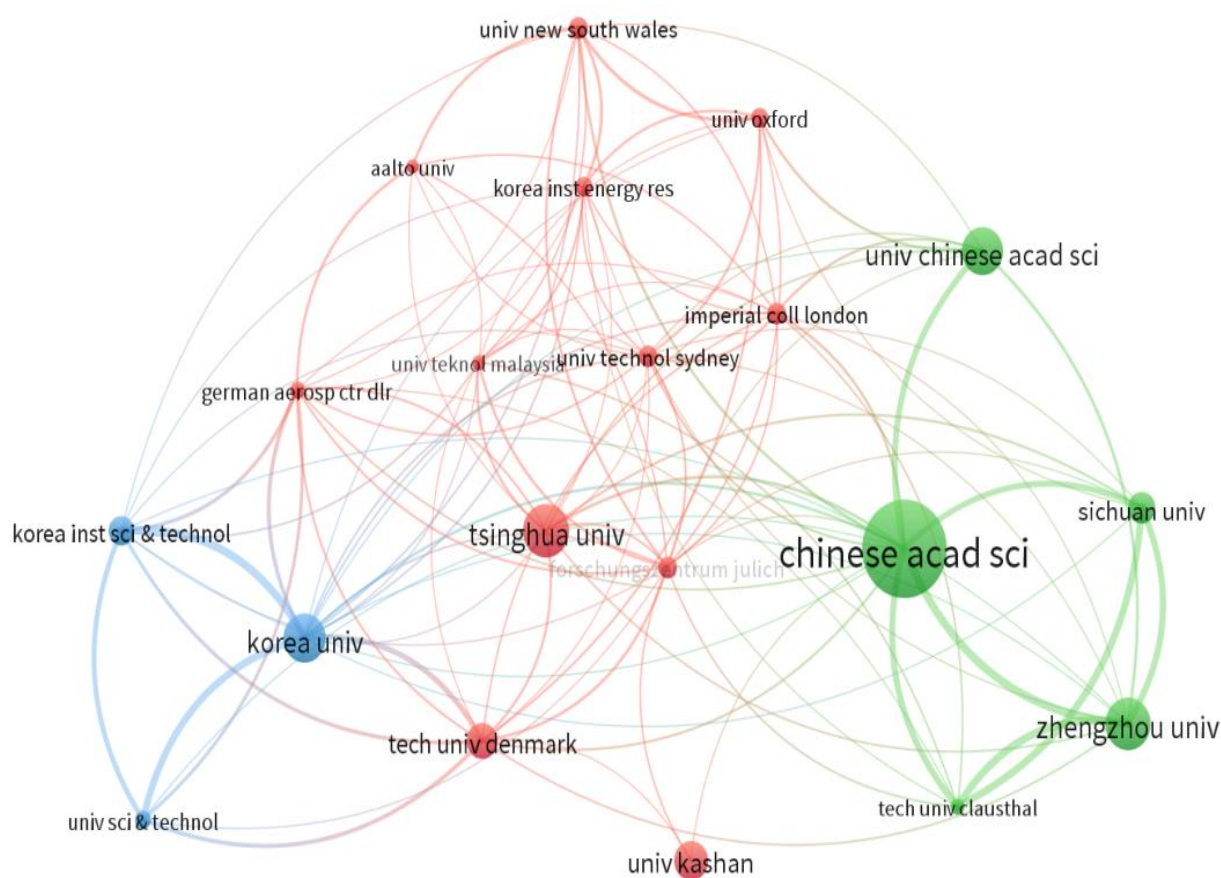
As linhas que conectam os países refletem as colaborações e citações compartilhadas entre eles. A densidade e espessura das conexões indicam que os países com mais citações também colaboram intensamente entre si, formando uma rede robusta de troca de conhecimento científico. A China, por exemplo, mantém colaborações significativas com diversos países, o que amplifica seu impacto global no campo.

Em termos comparativos, a China e os Estados Unidos lideram de maneira destacada tanto em número de publicações quanto de citações, refletindo suas capacidades de produção científica e tecnológica. Já países como Alemanha, Japão e Coreia do Sul, embora com um número menor de citações, apresentam alta qualidade nas publicações, contribuindo significativamente para o avanço do conhecimento sobre hidrogênio verde.

### **5.5 Rede de impacto e colaboração entre as organizações mais proeminentes em Armazenamento de Hidrogênio Verde (2014-2024)**

A colaboração entre organizações de pesquisa é um dos fatores fundamentais para o avanço científico e tecnológico no campo do armazenamento de hidrogênio verde, uma das soluções mais promissoras para a transição energética global. O mapeamento bibliométrico, exemplificado pela Figura 6, que foi gerado pelo software VOSviewer, apresenta as redes de impacto e colaboração entre as principais instituições que contribuíram para esse tema no período de 2014 a 2024.

Figura 6-Rede de impacto e colaboração entre as organizações mais proeminentes em Armazenamento de Hidrogênio Verde (2014-2024).



Fonte: Autora (2024)

Analisando o mapa da figura 6 pode se afirmar que as colaborações desempenham um papel central no desenvolvimento de inovações tecnológicas, uma vez que combinam expertises complementares, facilitando o compartilhamento de recursos e a disseminação do conhecimento. De acordo com Gupta et al. (2021), parcerias interinstitucionais são essenciais para promover inovações no campo das energias renováveis, especialmente em áreas emergentes como o hidrogênio verde. A análise das redes de colaboração entre as organizações mais citadas reflete essa dinâmica, mostrando como as principais instituições, como a *Chinese Academy of Sciences*, desempenham um papel de destaque na produção científica global, sendo uma das maiores colaboradoras, indicada no gráfico pela cor verde.

Outras instituições, como universidades e centros de pesquisa de países como Estados Unidos, Alemanha e Japão, também estão interconectadas, formando uma rede densa de citações e colaborações. A sinergia entre essas instituições é fundamental para o desenvolvimento de novas tecnologias e soluções de armazenamento que têm o potencial de

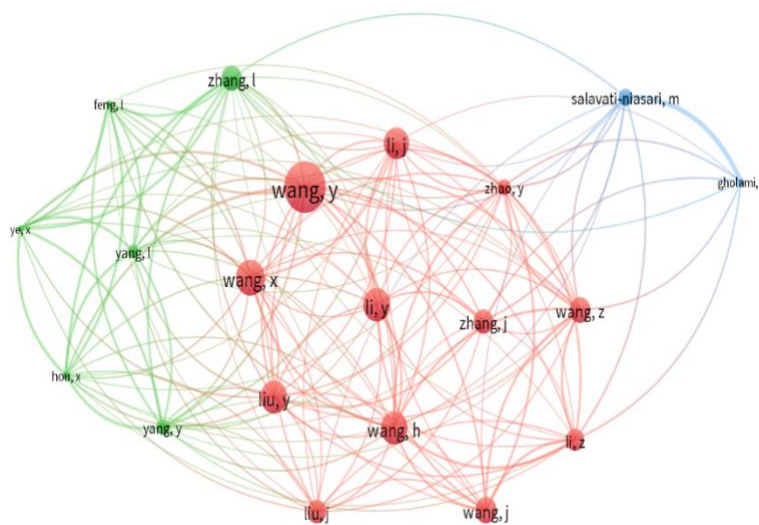
transformar o setor energético. Zhang et al. (2019) afirmam que a interação entre instituições com diferentes abordagens e capacidades de pesquisa contribui significativamente para o desenvolvimento de soluções mais eficientes no armazenamento de hidrogênio verde, uma vez que permite o acesso a diferentes áreas de conhecimento e infraestruturas.

Através dessas redes de colaboração, as organizações conseguem não apenas aumentar o impacto de suas pesquisas, mas também acelerar o desenvolvimento e a implementação de tecnologias de hidrogênio verde, conforme destacado por Hao et al. (2020). Isso é especialmente importante em um campo onde a inovação rápida e colaborativa é necessária para enfrentar os desafios globais de sustentabilidade e descarbonização.

### 5.6 Rede de citações entre os autores mais citados em pesquisas sobre Armazenamento de Hidrogênio Verde (2014-2024)

A análise da rede de citações entre os autores mais citados no campo do armazenamento de hidrogênio verde, representada pela figura 7, evidencia a importância das conexões e colaborações acadêmicas para o avanço da pesquisa nessa área. Essa rede destaca como alguns pesquisadores se tornaram referências centrais no desenvolvimento de novas tecnologias e abordagens para o armazenamento de hidrogênio verde, estabelecendo conexões significativas com outros autores que exploram temas complementares.

Figura 7- Rede de citações entre os autores mais citados em pesquisas sobre Armazenamento de Hidrogênio Verde (2014-2024), analisada com o vosviewer



Fonte: Autora (2024)

Os clusters destacados no mapa visual representam diferentes grupos de pesquisa e suas respectivas áreas de influência. O maior grupo, representado em vermelho, destaca os autores Wang, Y. e Wang, X. como os mais citados, indicando que suas pesquisas são amplamente referenciadas e possuem grandes impacto no campo. Um exemplo de artigo onde eles foram citados foi o artigo sobre avanços e limitações da produção, armazenamento e transporte de hidrogênio verde(DOS SANTOS PUGA; OLORTIGA ASENCIOS, 2023), isso reflete o papel proeminente desses autores na formulação de teorias e propostas práticas para soluções de armazenamento de hidrogênio. Como afirmam Li et al. (2020), a predominância de alguns autores-chave é fundamental para consolidar o conhecimento em áreas emergentes como o hidrogênio verde, criando uma base sólida para que outros pesquisadores possam construir sobre esse trabalho.

Na figura 7, outros grupos, representados em cores como verde e azul, reúnem autores que, embora possuam menos citações do que os líderes do campo, ainda desempenham um papel crucial no desenvolvimento de diferentes aspectos do armazenamento de hidrogênio. Zhou et al. (2018) destacam que colaborações entre autores de diferentes clusters são frequentemente responsáveis por avanços significativos, uma vez que combinam abordagens diversas e complementares.

O mapa de citações também demonstra como as redes de autores estão interligadas, formando um ecossistema colaborativo que acelera o desenvolvimento científico. Wang et al. (2019) ressaltam que essas redes de citações são indicativas de um fluxo constante de conhecimento entre pesquisadores, o que ajuda a disseminar inovações mais rapidamente dentro da comunidade científica.

## **6 Relação entre periódicos, países e autores principais na elaboração de pesquisas sobre Armazenamento de Hidrogênio Verde (2014-2024)**

As avaliações bibliométricas podem aumentar a integridade do processo de pesquisa e oferecer esperança para um ambiente acadêmico mais transparente e justo(MEHO; AKL, [s.d.]). Essa abordagem quantitativa analisa publicações acadêmicas, citações e outros indicadores relacionados para avaliar o desempenho de autores, instituições e países. No campo do hidrogênio verde, essa análise permite identificar quais pesquisadores e grupos estão na vanguarda da inovação e quais instituições estão contribuindo significativamente para o avanço do conhecimento.

A análise da produção científica em armazenamento de hidrogênio verde nos últimos 10 anos revela uma intensa colaboração internacional e o protagonismo de determinados países, periódicos e autores na disseminação do conhecimento sobre o tema. Esse campo de pesquisa é impulsionado por colaborações entre autores de diferentes países e instituições, resultando em uma rede global de citações e publicações que acelera o desenvolvimento de novas tecnologias sustentáveis. O armazenamento de hidrogênio verde, como discutido por Wang et al. (2019), é uma das tecnologias essenciais para a transição energética e a redução das emissões de carbono, sendo objeto de estudo de diversos pesquisadores em todo o mundo.

A Tabela 1 ilustra o ranking dos 10 principais periódicos, países, instituições e autores dos últimos 10 anos com maior número de publicações na área de armazenamento de hidrogênio verde.

Tabela 1- Principais periódicos, países, instituições e autores em publicações sobre armazenamento de hidrogênio verde (2014-2024).

Ranking		NP	NC	TLS
<b>Journals</b>				
1	International Journal of Hydrogen Energy	651	16240	1830
2	Energy	178	2589	730
3	Energy Conversion and Management	130	3845	743
4	Green Chemistry	95	4482	91
5	Chemical Engineering Journal	94	2344	100
6	Journal of Energy Storage	93	1239	290
7	Applied Energy	92	2730	432
8	Fuel	72	1263	267
9	Energy	65	1189	191
10	Journal of Materials Chemistry	64	3421	43
<b>Countries</b>				
1	China	1703	47686	2673
2	Usa	422	14703	1974
3	South Korea	402	12500	1574
4	Índia	317	9051	1437
5	Germany	291	9050	1718
6	Italy	252	7056	1601
7	England	226	6589	1469
8	Austrália	213	6890	1194
9	Iran	179	4324	735
10	Saudi Arábia	164	3379	707
<b>Institutions</b>				
1	Chinese acad sci	195	6836	171
2	Tsinghua univ	84	3448	43
3	Zhengzhou univ	82	2600	150
4	Korea univ	75	2926	206
5	Univ chinese acad sci	73	1904	56
6	Huazhong univ sci e technol	63	1725	38
7	Univ kashan	54	1681	4
8	Tech univ denmark	49	728	104
9	Sichuan univ	40	1658	100
10	Korea inst sci e technol	37	1919	125
<b>Authors</b>				
1	Wang, Y	144	3594	177
2	Wang, X	101	3922	93
3	Li, Y	95	3155	76
4	Wang, H	92	2786	149
5	Liu, Y	92	2044	97
6	Li, J	88	1796	68
7	Wang, J	75	1533	95
8	Wang, Z	73	1879	107
9	Zhang, I	71	1631	158
10	Zhang, J	68	1281	56

Fonte: Vanessa (2024)

A Tabela 1 evidencia a preeminência de periódicos como o International Journal of Hydrogen Energy, que lidera com o maior número de publicações, seguido pelo periódico Energy. Esses periódicos são frequentemente utilizados como plataforma de disseminação por autores de países que são líderes na área, como a China e os Estados Unidos, que se destacam

em volume de publicações. A China, por exemplo, publicou 1.703 documentos relacionados ao tema entre 2014 e 2024, consolidando sua liderança global. A Chinese Academy of Sciences, com 195 publicações, é a instituição mais produtiva nessa área, refletindo o papel central da pesquisa chinesa.

Os autores mais citados, como Wang, Y. e Wang, X., figuram entre os pesquisadores de maior impacto, com altos índices de citação e número de publicações. A colaboração entre autores de diferentes países e instituições, como observado por Zhou et al. (2018), fortalece o intercâmbio de conhecimento e a inovação tecnológica, acelerando o desenvolvimento de novas soluções para o armazenamento de hidrogênio verde.

De acordo com Li et al. (2020), a consolidação de redes colaborativas entre pesquisadores de diferentes instituições e países contribui para a disseminação de descobertas científicas e para a inovação tecnológica, permitindo avanços mais rápidos na área.

Portanto, a rede de citações entre periódicos, países, e autores revela a importância da colaboração internacional e o papel central de algumas instituições e indivíduos no desenvolvimento da pesquisa em armazenamento de hidrogênio verde. Essa análise demonstra como o intercâmbio de conhecimento e a produção colaborativa tem sido fundamental para o avanço das pesquisas nessa área emergente.

## **7 Análise bibliométrica dos principais artigos científicos mais citados sobre armazenamento de hidrogênio verde.**

A análise bibliométrica permite identificar os principais trabalhos acadêmicos que têm maior impacto em uma área de estudo específica, com base no número de citações recebidas. O estudo de temas como produção de hidrogênio, sustentabilidade energética e o papel da amônia na transição para uma economia de baixo carbono têm crescido significativamente nos últimos anos. O levantamento de citações é fundamental para medir a influência de artigos e autores no desenvolvimento de novas tecnologias e soluções energéticas (GLÄNZEL, 2003). A tabela 2, apresentada destaca os 10 artigos mais citados sobre armazenamento de hidrogênio verde, com foco em publicações que tratam de produção, armazenamento e aplicações tecnológicas desses elementos.

Tabela 2-Artigos mais citados sobre armazenamento de Hidrogênio Verde nos últimos 10 anos.

Ranking	Article Title	Authors	Journal	Year published	Total Citations	Reference
1	A comparative overview of Hydrogen production processes	Nikolaïdis, Pavlos; Poullikkas, Andreas	RENEWABLE & SUSTAINABLE ENERGY REVIEWS	2017	1739	(NIKOLAÏDIS; POULLIKKAS, 2017)
2	Hydrogen production from renewable and sustainable energy resources: Promising green energy carrier for clean development	Hosseini, Seyed Ehsan; Wahid, Mazlan Abdul	RENEWABLE & SUSTAINABLE ENERGY REVIEWS	2016	1493	(HOSSEINI; WAHID, 2016)
3	Functionalized hexagonal boronnitride nanomaterials: emerging properties and applications	Weng, Qunhong; Wang, Xuebin; Wang, Xi; Bando, Yoshio; Golberg, Dmitri	CHEMICAL SOCIETY REVIEWS	2016	951	(WENG et al., 2016)
4	Current and future role of Haber-Bosch ammonia in a carbon-free energy landscape	Smith, Collin; Hill, Alfred K.; Torrente-Murciano, Laura	ENERGY & ENVIRONMENTAL SCIENCE	2020	817	(SMITH; HILL; TORRENTE-MURCIANO, 2020)
5	Photocatalytic Conversion of Nitrogen to Ammonia with Water on Surface Oxygen Vacancies of Titanium Dioxide	Hirakawa, Hiroaki; Hashimoto, Masaki; Shiraishi, Yasuhiro; Hirai, Takayuki	JOURNAL OF THE AMERICAN CHEMICAL SOCIETY	2017	702	(HIRAKAWA et al., [s.d.])
6	Hydrogen storage and delivery: Review of the state of the art technologies and risk and reliability analysis	Moradi, Ramin; Groth, Katrina M.	INTERNATIONAL JOURNAL OF HYDROGEN ENERGY	2019	671	(FALCONE; HIETE; SAPIO, 2021)
7	Technologies and perspectives for achieving carbon neutrality	Wang, Fang; Harindintwali, Jean Damascene; Yuan, Zhizhang; Wang, Min; Wang, Faming	INNOVATION	2021	610	(WANG et al., 2021)
8	A review on production, storage of hydrogen and its	Dutta, Suman	JOURNAL OF INDUSTRIAL	2014	542	(DUTTA, 2014)

	utilization as an energy resource		AND ENGINEERING CHEMISTRY			
9	Hydrogen in energy transition: A review	Kovac, Ankica; Paranos, Matej; Marcius, Doria	INTERNATIONAL JOURNAL OF HYDROGEN ENERGY	2021	510	(KOVAČ; PARANOS; MARCIUŠ, 2021)
10	Monolayer Ti <sub>2</sub> CO <sub>2</sub> : A Promising Candidate for NH <sub>3</sub> Sensor or Capturer with High Sensitivity and Selectivity	Yu, Xue-fang; Li, Yan-chun; Cheng, Jian-bo; Liu, Zhen-bo; Li, Qing-zhong; Li, Wen-zuo;	ACS APPLIED MATERIALS & INTERFACES	2015	507	(YU et al., [s.d.])

**Fonte:** Autora (2024)

A Tabela 2 apresenta uma lista dos principais artigos acadêmicos sobre armazenamento de hidrogênio verde, ordenados pelo número de citações recebidas até o momento. O artigo mais citado, de Nikolaidis e Poullikkas (2017), apresenta uma visão comparativa dos processos de produção de hidrogênio, o que reflete a importância de compreender as diferentes abordagens tecnológicas para essa fonte de energia.

O segundo artigo, de Hosseini e Wahid (2016), também publicado na *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, destaca o potencial do hidrogênio como transportador de energia verde, reforçando seu papel na promoção do desenvolvimento limpo, enquanto outros trabalhos como o de Smith, Hill e Torrente-Murciano (2020), publicado em *Energy & Environmental Science*, analisam o papel da amônia produzida pelo processo Haber-Bosch na transição energética para um futuro sem carbono.

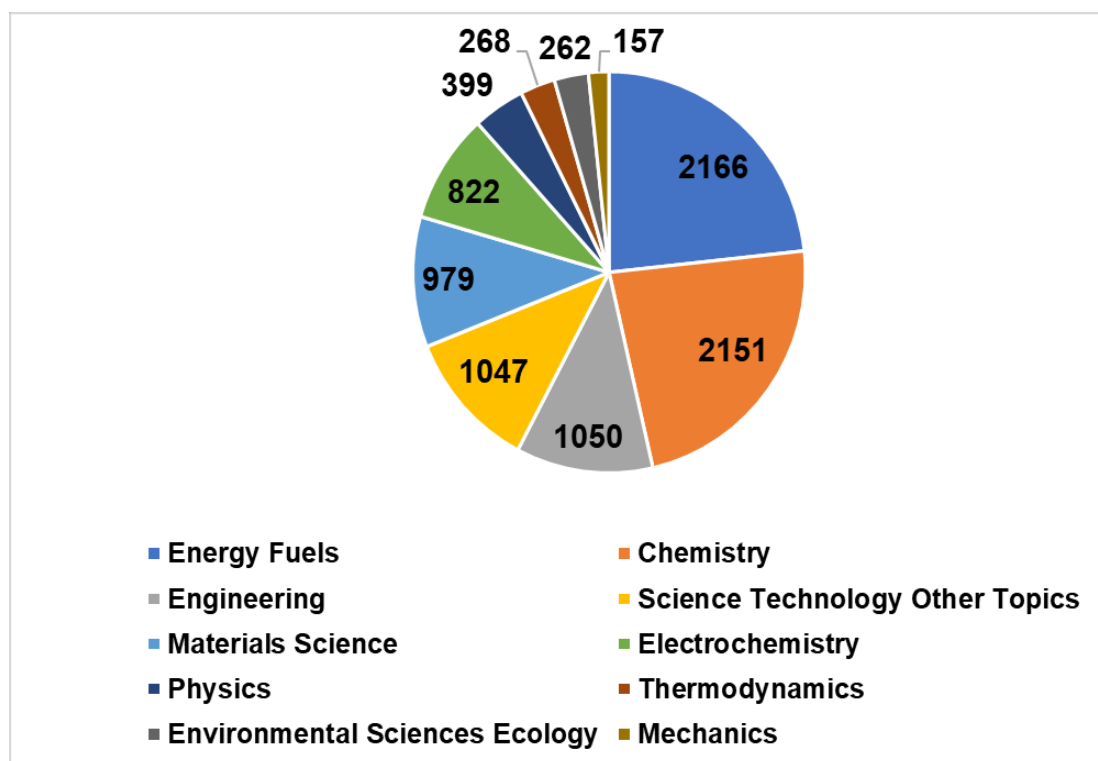
Outro artigo citado foi o *Current and Future Role of Haber–Bosch Ammonia in a Carbon-Free Energy Landscape*, que explora como o processo Haber-Bosch, tradicionalmente alimentado por metano, pode ser adaptado para um futuro sem carbono (SMITH; HILL; TORRENTE-MURCIANO, 2020). Os autores Smith et al. (2020) abordam a dependência de combustíveis fósseis, como o gás natural, que libera grandes quantidades de CO<sub>2</sub> na produção de amônia. Esses dados indicam que os artigos mais influentes abordam tanto a produção de hidrogênio quanto seu armazenamento, além de explorar o papel de tecnologias associadas, como o uso da amônia. Esse foco em hidrogênio e tecnologias correlatas demonstra uma atenção crescente ao tema, o que é corroborado por autores como Van Raan (2004), que afirma

que o aumento no número de citações geralmente está associado à relevância e ao avanço de uma área de pesquisa emergente.

## 8 Áreas de pesquisa sobre armazenamento de hidrogênio verde

A pesquisa sobre o armazenamento de hidrogênio verde é marcadamente multidisciplinar, abrangendo várias áreas do conhecimento, desde ciências exatas até aplicações tecnológicas. A relevância do hidrogênio como uma alternativa energética sustentável tem incentivado uma ampla gama de estudos, conforme observado no crescimento significativo das publicações nas áreas de energia, química, tecnologia e engenharia. Como destaca Van Raan (2004), a interdisciplinaridade é característica central em pesquisas emergentes que buscam solucionar problemas globais complexos, como a transição para fontes de energia mais limpas. A análise da figura 8 reforça essa perspectiva ao ilustrar as principais áreas que contribuem para o desenvolvimento de soluções de armazenamento de hidrogênio.

Figura 8-Fluxograma com o número e áreas que mais pesquisaram sobre armazenamento de hidrogênio verde.



Fonte: Autora (2024)

A figura 8 mostra a distribuição das principais áreas de pesquisa relacionadas ao armazenamento de hidrogênio verde. A área de *Energy Fuels* lidera com 2.166 publicações, evidenciando o foco central na energia como uma questão-chave para o futuro sustentável. Estudos voltados para o armazenamento de hidrogênio têm explorado soluções que promovam

maior eficiência e viabilidade comercial dessa fonte energética. A predominância dessa área é consistente com a crescente demanda por energias limpas, conforme enfatizado por Gupta, Jain e Sharma (2021), que ressaltam o papel vital das fontes renováveis na mitigação das mudanças climáticas.

Logo em seguida, a área de *Chemistry* aparece com 2.151 publicações. O interesse químico no tema reflete a importância de novos materiais e processos químicos no desenvolvimento de tecnologias de armazenamento de hidrogênio. Weng et al. (2016) destacam o potencial de novos materiais, como os nanomateriais hexagonais de boro, para melhorar a eficiência e segurança do armazenamento. A pesquisa química, portanto, está fortemente ligada à inovação na produção e conservação de hidrogênio.

Em terceiro lugar, *Science Technology OtherTopics* conta com 1.050 publicações, mostrando o caráter abrangente do tema, que se estende para outras áreas tecnológicas. O impacto das novas tecnologias sobre o armazenamento de hidrogênio é inegável, conforme apontado por Moradi e Groth (2019), que discutem o estado da arte e os avanços nas tecnologias de armazenamento de hidrogênio, bem como os desafios relacionados à confiabilidade e segurança.

Por fim, a área de *Engineering* aparece com 1.047 publicações. A engenharia desempenha um papel essencial no desenvolvimento de infraestruturas adequadas para o armazenamento e transporte de hidrogênio. A necessidade de soluções práticas para problemas de implementação tecnológica é uma preocupação constante em pesquisas de engenharia, o que confirma a relevância dessa área no processo de transição para uma economia baseada no hidrogênio (Wang et al., 2019).

### **8.1 Análise da rede de palavras-chave em armazenamento de hidrogênio verde: Uma perspectiva de pesquisa dos últimos 10 anos**

O armazenamento de hidrogênio verde tem emergido como uma área crucial na busca por soluções energéticas sustentáveis. Nos últimos dez anos, diversas pesquisas têm explorado suas implicações tecnológicas, econômicas e ambientais. A análise das redes de palavras-chave é uma ferramenta valiosa para entender as tendências e as interconexões dentro desse campo. Este estudo visa examinar a evolução das palavras-chave mais relevantes, identificando as principais áreas de foco e como elas se relacionam entre si, conforme ilustrado na Figura 9 e figura 10.



as palavras mais frequentes, destacam-se *storage*, *Green hydrogen* e *energy*, que são fundamentais para entender o contexto atual das pesquisas nesse campo. A palavra *storage* reflete a necessidade de desenvolver tecnologias eficazes para capturar e armazenar hidrogênio produzido de forma sustentável.

A palavra *Green hydrogen* indica a ênfase crescente em fontes de energia renováveis e em processos que não emitem carbono. Finalmente, *energy* conecta esses conceitos à discussão mais ampla sobre a transição energética e a busca por alternativas sustentáveis.

As figuras 9 e 10 ilustram também as ligações entre essas palavras, evidenciadas por linhas que conectam os termos. Essas conexões indicam a interdependência entre os conceitos, sugerindo que o armazenamento de hidrogênio verde não pode ser considerado isoladamente, mas deve ser analisado em relação a outras dimensões da produção e consumo de energia.

De acordo com Borgman (2007), as palavras-chave são fundamentais para organizar e classificar a informação, ajudando na identificação de padrões e na facilitação do acesso a dados relevantes. Assim, as interconexões evidenciadas na figura não apenas revelam a estrutura do conhecimento no campo, mas também apontam para novas direções para futuras pesquisas.

A análise das palavras-chave no contexto do armazenamento de hidrogênio verde oferece subsídios valiosos sobre as tendências de pesquisa e as áreas que merecem maior atenção. A interconexão das palavras-chave demonstra a complexidade do tema e a necessidade de abordagens integradas que considerem as várias facetas do hidrogênio verde no futuro da energia.

## **8.2 Análise das palavras-chave no estudo sobre armazenamento de hidrogênio verde: Um ranking das principais tendências de pesquisa**

O armazenamento de hidrogênio verde representa uma das soluções promissoras para a transição energética em direção a fontes mais sustentáveis e eficientes. A análise das palavras-chave utilizadas nas publicações científicas sobre este tema permite identificar as áreas de maior interesse e as relações entre os conceitos que compõem esse campo de estudo.

A Tabela 3 apresenta o ranking das 20 palavras mais frequentes, revelando perspicácias importantes sobre as prioridades da pesquisa em armazenamento de hidrogênio. Pesquisar as palavras mais frequentes em estudos sobre armazenamento de hidrogênio verde é essencial para identificar as principais tendências, tecnologias, desafios e oportunidades na área.

Tabela 3-Palavras-chave no estudo sobre armazenamento de hidrogênio verde: Um ranking das principais tendências de pesquisa

Rank	Keywords	Occurrences	TLS	Rank	Keyword	Occurrences	TLS
1	Storage	751	1353	11	Design	285	519
2	Hydrogen	720	1064	12	Energy storage	252	322
3	Performance	620	958	13	Water	235	339
4	Green hydrogen	460	884	14	Electrolysis	229	519
5	Energy	458	816	15	Hydrogen production	229	328
6	Hydrogen storage	441	438	16	Catalysts	225	298
7	Renewable energy	378	736	17	Graphene	207	235
8	Optimization	322	633	18	Generation	206	414
9	Nanoparticles	316	375	19	Water Electrolysis	205	462
10	System	262	550	20	Efficient	198	265

Fonte: Autor (2024)

A tabela 3 ilustra as 20 palavras-chave mais frequentes em estudos sobre armazenamento de hidrogênio verde. A partir de um total de 5.762 palavras, foram identificadas 1.442 que apareceram em pelo menos cinco documentos publicados. Dentre essas, a palavra *Storage* se destaca como a mais citada, com 751 ocorrências e uma força total de ligação (TLS) de 1.353.

Essa predominância da palavra *Storage* um indicativo da centralidade do armazenamento na pesquisa sobre hidrogênio verde, refletindo a importância de desenvolver tecnologias que possibilitem uma gestão eficiente desse recurso energético. Conforme apontado por Nørgaard et al. (2019), “o armazenamento é crucial para a viabilidade do hidrogênio verde como uma alternativa energética, pois permite que a produção e o consumo sejam alinhados temporalmente” (NØRGAARD et al., 2019, p. 129).

Outras palavras-chave significativas incluem *hydrogen* (720 ocorrências), *performance* (620), e *green hydrogen* (460). A presença de termos como *performance* indica uma preocupação com a eficiência e eficácia das tecnologias relacionadas ao hidrogênio, conforme destacado por Zhang et al. (2020), que afirmam que “a avaliação do desempenho das tecnologias de armazenamento é essencial para sua adoção em larga escala” (ZHANG et al., 2020, p. 102).

Ademais, a inclusão de *renewable energy* (378) e *hydrogen production* (229) enfatiza a intersecção entre o armazenamento de hidrogênio e a produção de energia renovável, sugerindo

que a pesquisa nesse campo está se movendo em direção a um modelo integrado de geração e armazenamento energético.

A força total de ligação (TLS) também oferece uma perspectiva sobre como essas palavras estão interconectadas, com storage apresentando a maior TLS, seguida por hydrogen e performance. A força das ligações entre essas palavras revela uma rede complexa de relações que pode indicar áreas prioritárias para investigações futuras.

A análise do ranking das palavras-chave no contexto do armazenamento de hidrogênio verde fornece uma visão clara das tendências e prioridades na pesquisa. As conexões entre os termos revelam a necessidade de uma abordagem integrada para a exploração do hidrogênio como uma solução energética sustentável, refletindo uma direção promissora para futuras investigações.

## **9 Conceitos de energias renováveis e hidrogênio verde**

As energias renováveis são definidas como aquelas que possuem a capacidade de serem constantemente reabastecidas por fontes naturais, como o sol, o vento e a biomassa, contrastando com os combustíveis fósseis que demandam milhões de anos para se formarem e que, ao serem queimados, liberam grandes quantidades de dióxido de carbono, contribuindo para o aquecimento global (CHENG; HAMED, 2021). No cenário das energias renováveis, o hidrogênio verde tem se destacado como uma solução promissora devido à sua produção por meio da eletrólise da água, processo que utiliza eletricidade proveniente de fontes renováveis, como a solar e a eólica. Essa metodologia é especialmente vantajosa por não emitir gases poluentes, configurando-se como uma opção de energia limpa e de baixo carbono (Sherif; Barbir; Veziroglu, 2020).

O hidrogênio verde se posiciona como um vetor energético, isto é, um meio para transportar e armazenar energia de forma eficaz, permitindo sua utilização em setores de difícil descarbonização, como o industrial, o de transporte pesado e o de geração de eletricidade (Moradi; Groth, 2019, p. 12255). Para Esswein e Friedl (2020), o hidrogênio verde possui o potencial de transformar o cenário energético global ao atuar tanto como um substituto direto dos combustíveis fósseis em várias indústrias, quanto como um apoio à integração de energias renováveis em redes elétricas, proporcionando estabilidade energética em momentos de baixa geração de fontes intermitentes, como a solar e a eólica.

No contexto de descarbonização da economia, Timmers et al. (2021) observam que o hidrogênio verde não só contribui para a redução das emissões de carbono, mas também para a segurança energética, especialmente para países com abundância de fontes renováveis. Assim, investir na produção de hidrogênio verde torna-se uma estratégia crucial para a transição energética sustentável. Segundo Budinis et al. (2020), o desenvolvimento de uma economia baseada em hidrogênio verde pode auxiliar na criação de novos empregos e indústrias especializadas, promovendo, ao mesmo tempo, a independência energética e a mitigação das mudanças climáticas.

Essa tecnologia, portanto, representa um avanço significativo na busca por alternativas aos combustíveis fósseis, com uma crescente aceitação no setor industrial, sobretudo em países da União Europeia e no Japão, que buscam acelerar a transição para uma economia de baixo carbono (Li; Zhang; Sun, 2020, p. 282). A produção de hidrogênio verde a partir de fontes renováveis, como a energia solar e a eólica, é ainda mais relevante ao considerar a sustentabilidade a longo prazo, já que aproveita recursos amplamente disponíveis e sustentáveis, alinhando-se aos objetivos globais de reduzir as emissões e conter o aquecimento global (IRENA, 2019).

O conceito de hidrogênio verde refere-se ao hidrogênio produzido a partir de fontes renováveis, como a eletrólise da água utilizando energia solar ou eólica, em vez de métodos convencionais que dependem de combustíveis fósseis.

### **9.1 Importância econômica do hidrogênio verde**

O interesse e o compromisso com a economia do hidrogênio tiveram um rápido crescimento na última meia década e, particularmente, nos últimos dois anos. Desde 2017, mais de 30 países (e no caso da União Europeia [UE], uma união política) estabeleceram ou anunciaram o desenvolvimento de estratégias de hidrogênio, com investimentos financeiros para apoiar essas estratégias (DILLMAN; HEINONEN, 2022). O desenvolvimento do hidrogênio verde não apenas transforma a matriz energética, mas também impacta de maneira abrangente a economia mundial. Conforme destacado por Li, Zhang e Sun (2020), a produção em escala de hidrogênio verde pode fomentar a criação de novos mercados. Essa dinâmica é corroborada por outras pesquisas que enfatizam o papel do hidrogênio verde como um vetor de inovação tecnológica. Por exemplo, estudos de IRENA (2020) indicam que a adoção de tecnologias de hidrogênio verde pode levar a uma redução significativa nos custos de energia, promovendo um ciclo virtuoso de investimentos e desenvolvimento tecnológico.

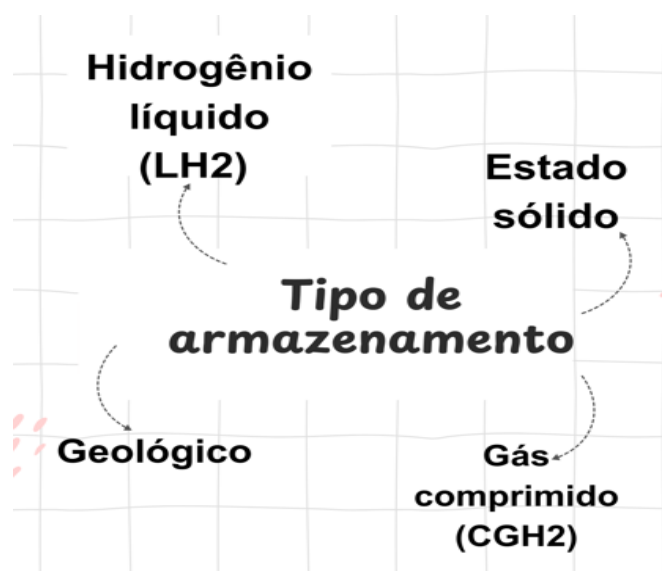
Além disso, a transição para uma economia baseada em hidrogênio verde contribui para a redução da dependência de combustíveis fósseis. Como observa H<sub>2</sub> View (2021), essa independência energética pode fortalecer a segurança energética de países que atualmente são vulneráveis a flutuações nos preços de petróleo e gás natural. O hidrogênio verde oferece uma alternativa viável, especialmente para nações com recursos renováveis abundantes.

Segundo Woods et al. (2022) a indústria da água produz fluxos de águas residuais que podem se tornar uma fonte sustentável de hidrogênio, como a opção preferida em relação à água potável ou dessalinizada (WOODS; BUSTAMANTE; AGUEY-ZINSOU, 2022).

## 9.2 Avanços tecnológicos e materiais para armazenamento de hidrogênio

Os avanços tecnológicos no campo do armazenamento de hidrogênio têm se mostrado fundamentais para a viabilização do hidrogênio verde como uma alternativa energética segura e eficiente. Atualmente as principais tecnologias de armazenamento existentes são: hidrogênio líquido (LH<sub>2</sub>) em tanques criogênicos, no estado sólido, por adsorção em 25 hidretos metálicos, armazenamento geológico, e o mais comum, o armazenamento na forma de gás comprimido (CGH<sub>2</sub>) em vasos de pressão, (RECIFE, 2023a). A figura 11, ilustra os tipos de armazenamento já citados acima.

Figura 11-Classificação dos tipos de armazenamento de hidrogênio verde.



Fonte: Autora (2024)

A pesquisa e o desenvolvimento de novos materiais, especialmente nanomateriais e compostos inovadores, têm contribuído significativamente para melhorar as capacidades de armazenamento e a segurança dos sistemas relacionados ao hidrogênio. Os nanomateriais têm

características únicas que os tornam especialmente adequados para o armazenamento de hidrogênio. Segundo Weng et al. (2016, p. 398), os nanomateriais de nitreto de boro funcionalizados são particularmente promissores devido às suas propriedades estáveis e à alta capacidade de adsorção de hidrogênio. A funcionalização desses nanomateriais permite que eles interajam de forma mais eficaz com o hidrogênio, aumentando a quantidade que pode ser armazenada em um dado volume.

O armazenamento de hidrogênio é um desafio fundamental na busca por uma economia de hidrogênio viável e sustentável. Como afirmado por Niaz (2015), às pesquisas nesse campo visam desenvolver materiais seguros, confiáveis, compactos e econômicos que possam ser utilizados na tecnologia de células de combustível. O hidrogênio como qualquer outro produto, precisa ser embalado, transportado, armazenado e transferido, desde a produção até o uso final (DANTON et al., [s.d.]).

O armazenamento de hidrogênio em estado sólido se destaca como uma opção atraente devido ao seu potencial de armazenamento de alta densidade, maior segurança e facilidade de transporte. Considerando o armazenamento de hidrogênio em estado sólido, vale ressaltar que o carvão ativado é um dos métodos possíveis devido à sua grande disponibilidade, facilidade de fabricação e custo-benefício. No entanto, este método apresenta apenas uma capacidade de armazenamento moderada e sua suscetibilidade à contaminação. Outra metodologia que aplica materiais inovadores é a que utiliza nanotubos de carbono devido à sua leveza, estabilidade térmica e robustez mecânica. No entanto, essa solução deve superar desafios como os ligados à regulação das dimensões dos nanotubos e à suscetibilidade a danos estruturais. Além disso, as estruturas metal-orgânicas com sua estrutura de poros abertos têm a capacidade de operar sob baixas pressões e têm cinética rápida de adsorção e dessorção de hidrogênio (PEREIRA et al., 2024).

Ainda citado por (PEREIRA et al., 2024), considerando agora o armazenamento de hidrogênio em estado líquido, os transportadores de hidrogênio orgânico líquido podem armazenar uma grande quantidade de hidrogênio em um espaço comparativamente pequeno e são seguros. No entanto, eles precisam de uma grande quantidade de energia para converter hidrogênio e para os transportadores de hidrogênio orgânico líquido, e essa energia pode ser cara, principalmente em aplicações de grande escala. A solução de amônia apresenta elevada capacidade de armazenamento de hidrogênio, cinética rápida de hidrogênio e economia.

O armazenamento de hidrogênio em estado gasoso é muito adequado para veículos com células de combustível, pode ser reabastecido rapidamente e pode ser facilmente integrado às

instalações e infraestruturas existentes. No entanto, esse tipo de armazenamento requer grande volume e fragilização por hidrogênio, e os vasos de pressão usados podem apresentar problemas de vazamento e perda de energia em altas pressões, sendo uma alternativa cara (PEREIRA et al., 2024).

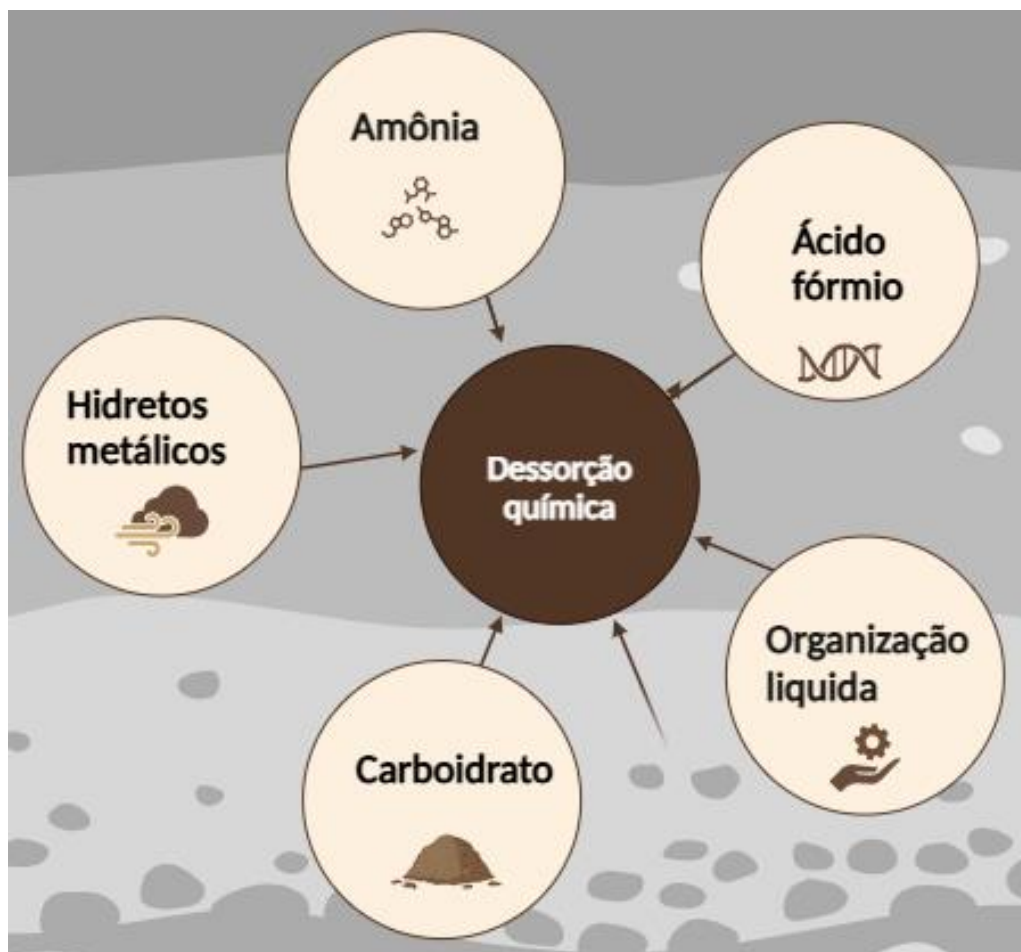
Segundo (RECIFE, 2023b), citando alguns autores, a principal opção para o armazenamento de hidrogênio em larga escala a médio e longo prazo é o armazenamento geológico ou subterrâneo, que consiste basicamente em injetar gás hidrogênio no subsolo e mantê-lo sob pressão para uso futuro (ELBERRY, 2021; YUE, et al., 2021). Existem alguns principais tipos de estruturas que podem ser usadas como reservatório geológico para o gás hidrogênio, como aquíferos, depósitos esgotados de gás natural e petróleo, cavernas de sal e minas abandonadas (ELBERRY, 2021; MAŁACHOWSKA et al., 2021).

Este tipo de armazenamento apresenta alguns desafios, como a durabilidade das tubulações podendo haver o desgaste do material pela interação com o hidrogênio, os custos com a compressão inicial necessária para a injeção e retirada do material, possíveis reações químicas com o hidrogênio que podem causar contaminação ou perda de parte do gás, a necessidade de uma quantidade mínima de gás no interior da estrutura para manter a pressão do reservatório, algumas dúvidas em relação ao volume, localização e profundidade do poço e alguns obstáculos legais, sociais e ambientais referentes às legislações do país e à aceitação pública (BARBOSA, 2020; ELBERRY, 2021; MAŁACHOWSKA et al., 2021; YUE, et al., 2021).

Contudo, a diversidade de métodos disponíveis é positiva, mas o foco na redução de custos e aumento da eficiência é fundamental para tornar o hidrogênio competitivo em uma matriz energética sustentável.

A figura 12 e a figura 13 ilustram diferentes matérias-primas utilizadas na dessorção química e dessorção física para armazenamento de hidrogênio.

Figura 12-Principais matérias-primas para dessorção química no armazenamento de hidrogênio.

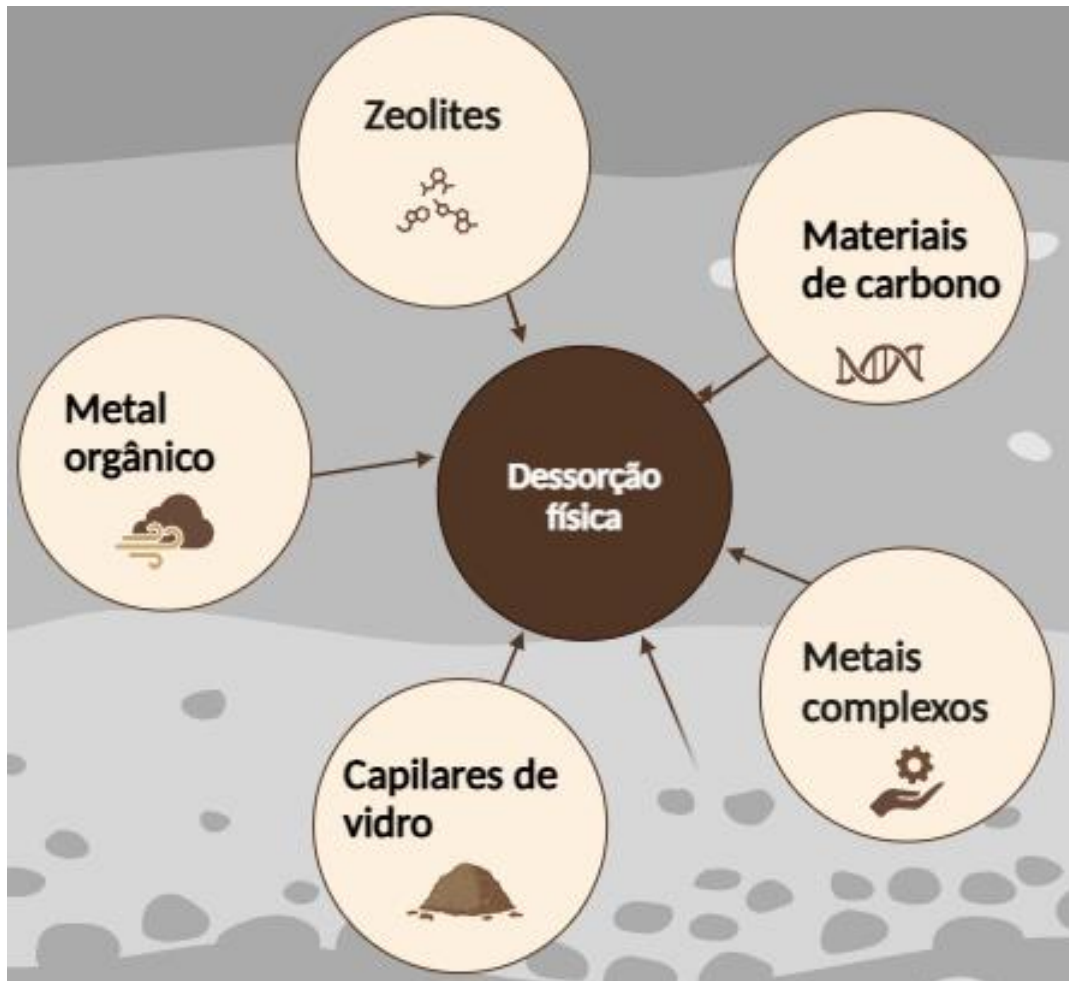


Fonte: Autora (2024)

Esses materiais desempenham papéis fundamentais na busca por soluções eficientes e seguras para o armazenamento de hidrogênio, cada um com suas vantagens e desafios específicos para diferentes aplicações e escalas de uso.

O armazenamento de hidrogênio por meio de dessorção física, como pode ser visto na figura 13, envolve a utilização de materiais que adsorvem hidrogênio na superfície ou em estruturas porosas. Esses materiais permitem o armazenamento de hidrogênio em estado sólido ou gasoso, muitas vezes em condições de baixa temperatura ou pressão moderada.

Figura 13-Principais materiais para dessorção física no armazenamento de hidrogênio.



Fonte: Autora (2024)

Este método de armazenamento é recomendado por ser reversível, permitindo que o hidrogênio seja armazenado e liberado de forma controlada. Segundo Caribe (2023) uma grande variedade de materiais causa uma influência direta ao armazenamento de hidrogênio (CARIBE, 2023). Na figura 10 e figura 11 apresenta diferentes estados de armazenamento de hidrogênio, sabemos que o hidrogênio a temperatura ambiente e a pressão atmosférica encontram-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).

### 9.3 Vantagens e desvantagens no armazenamento de hidrogênio verde

Segundo (DANTON et al., 2023), o armazenamento de hidrogênio no estado gasoso, utilizando tanques de alta pressão, é uma técnica amplamente adotada, especialmente em aplicações de curto e médio prazo. Ele oferece uma série de vantagens, incluindo simplicidade de design e uma alta eficiência energética durante o uso. A compressão do hidrogênio aumenta a densidade de energia por volume, tornando-o adequado para uso em veículos e aplicações residenciais e comerciais. No entanto, o armazenamento no estado gasoso também apresenta desvantagens consideráveis. A eficiência volumétrica e gravimétrica é limitada, o que significa que grandes volumes de espaço são necessários para armazenar quantidades significativas de hidrogênio (DANTON et al., 2023). Além disso, os custos associados à compressão, seleção de materiais, consumo de eletricidade e manutenção são substanciais, o que o torna menos preferível comercialmente em comparação com outras opções de armazenamento (ZÜTTEL et al., 2003). O armazenamento de hidrogênio no estado líquido oferece uma alta densidade de armazenamento, tornando-o adequado para aplicações que requerem grandes quantidades de hidrogênio em espaços limitados, como automóveis e aeronaves ((DANTON et al., 2023). No entanto, esta abordagem tem desvantagens significativas, especialmente em termos de eficiência energética.

O processo de liquefação do hidrogênio envolve altos consumos de energia devido à compressão e resfriamento do gás a temperaturas criogênicas. Além disso, a evaporação contínua devido ao vazamento de calor limita sua aplicação a cenários onde o custo do hidrogênio não é um fator crítico e o gás é consumido rapidamente. A segurança é considerada uma vantagem, pois o hidrogênio líquido requer aquecimento antes de se dispersar no ambiente em caso de vazamento, tornando sua dispersão mais lenta (NIAZ, 2015). O armazenamento de hidrogênio por absorção em materiais, como hidretos metálicos, oferece uma alta densidade volumétrica de hidrogênio, tornando-o eficaz para o armazenamento compacto. No entanto, a capacidade gravimétrica é limitada, normalmente abaixo de 3% em massa, o que é uma desvantagem significativa para aplicações em veículos, devido ao aumento de peso e tamanho dos tanques. Além disso, o armazenamento por absorção é afetado por problemas de temperatura durante o enchimento e a liberação do hidrogênio, o que pode afetar a vida útil desses materiais (DANTON et al. (2023). No entanto, é considerado seguro, pois a pressão no recipiente é insignificante, evitando vazamentos rápidos e perigosos, mas requer controle estrito da pureza do hidrogênio armazenado para evitar reações prejudiciais (SANTOS, 2005).

#### **9.4 Inovações em armazenamento**

Além dos nanomateriais de nitreto de boro, outras inovações tecnológicas têm surgido no campo do armazenamento de hidrogênio. Entre elas estão os hidretos metálicos, que são compostos que podem absorver e liberar hidrogênio de maneira eficiente. Pesquisas mostram que hidretos como o hidreto de magnésio e o hidreto de sódio têm potencial significativo para aplicações práticas (Züttel, 2003). Esses materiais podem armazenar hidrogênio em densidades superiores e liberá-lo de maneira controlada, tornando-os candidatos promissores para armazenamento em larga escala.

Outra abordagem inovadora é o uso de materiais à base de carbono, como grafeno e nanotubos de carbono. Os trabalhos de Li et al. (2014) e Korkmaz et al. (2017) demonstram que esses materiais têm sido estudados pela sua alta capacidade de adsorção e excelente condutividade, características que os tornam atraentes para aplicações em armazenamento de hidrogênio.

Os avanços tecnológicos e os novos materiais para o armazenamento de hidrogênio estão na vanguarda da pesquisa em energia sustentável. A utilização de nanomateriais, como os nitretos de boro funcionalizados, não apenas melhora a eficiência e a segurança do armazenamento de hidrogênio, mas também contribui para aumentar sua densidade energética, tornando o hidrogênio verde uma opção mais competitiva no mercado global. À medida que as tecnologias continuam a evoluir, a colaboração entre cientistas, engenheiros e indústrias será crucial para transformar essas inovações em soluções práticas e acessíveis para o armazenamento de hidrogênio, facilitando a transição para uma economia de baixo carbono.

#### **9.5 Aumentando a densidade energética**

A densidade energética é um fator crítico para a competitividade do hidrogênio como fonte de energia. Zhang et al (2018), enfatizam que o uso de nanomateriais inovadores pode significativamente aumentar a densidade energética dos sistemas de armazenamento de hidrogênio. Isso é especialmente importante para aplicações em transporte, onde o espaço e o peso são considerações cruciais. Materiais que podem armazenar mais hidrogênio em menos volume tornam-se essenciais para veículos movidos a hidrogênio, como automóveis, ônibus e caminhões.

De acordo com Chahine et al. (2016), a densidade energética do hidrogênio pode ser melhorada por meio do uso de materiais de armazenamento avançados que possibilitem altas

taxas de adsorção e liberação, tornando o hidrogênio uma opção viável para o armazenamento em larga escala.

## **10 Desafios e oportunidades na infraestrutura de armazenamento e transporte de hidrogênio verde**

A infraestrutura de armazenamento e transporte de hidrogênio verde é fundamental para a viabilização da sua utilização em larga escala, especialmente no contexto da transição para uma economia de baixo carbono. No entanto, essa infraestrutura enfrenta diversos desafios técnicos, logísticos e financeiros que precisam ser superados para garantir que o hidrogênio verde se torne uma solução viável e competitiva no mercado energético global.

### **10.1 Desafios técnicos**

Os desafios técnicos relacionados ao armazenamento e transporte de hidrogênio verde são significativos. Moradi e Groth (2019) ressaltam que a escolha das tecnologias de armazenamento é crucial para a segurança e a confiabilidade da cadeia de suprimento de hidrogênio. As opções incluem armazenamento em estado gasoso, líquido ou em sólidos, cada uma com suas vantagens e desvantagens. O armazenamento em estado gasoso, por exemplo, requer pressões elevadas e pode ser suscetível a vazamentos, enquanto o armazenamento líquido apresenta desafios em termos de temperaturas extremamente baixas.

Além disso, o transporte do hidrogênio também apresenta desafios. Segundo Nørgaard et al. (2019), as infraestruturas existentes para o transporte de gás natural não são totalmente adequadas para o hidrogênio devido às suas propriedades químicas distintas. O hidrogênio pode causar a fragilização de materiais metálicos e aumentar a necessidade de manutenção nas infraestruturas existentes. Portanto, o desenvolvimento de novos materiais e tecnologias para tubulações e tanques é necessário para garantir um transporte seguro e eficiente do hidrogênio.

### **10.2 Oportunidades de inovação**

Apesar dos desafios, existem oportunidades significativas para inovação e desenvolvimento no setor de armazenamento e transporte de hidrogênio. Nørgaard et al. (2019) destacam que, com investimentos adequados em pesquisa e desenvolvimento, é possível criar soluções tecnológicas que não apenas atendam às necessidades atuais, mas que também integrem o hidrogênio nas redes de energia de maneira eficaz.

O desenvolvimento de tecnologias emergentes como sistemas de armazenamento em estado sólido ou hidrogênio químico, pode transformar a forma como o hidrogênio é armazenado e transportado. De acordo com Moradi e Groth (2019), essas inovações não só melhorariam a segurança, mas também aumentariam a eficiência e a economia do transporte de hidrogênio.

### **10.3 Necessidade de investimentos**

A construção de uma infraestrutura adequada para o armazenamento e transporte de hidrogênio verde requer investimentos substanciais. Moradi e Groth (2019) também apontam que os custos de instalação de novas infraestruturas, bem como a atualização das existentes, podem ser elevados. No entanto, é crucial que governos e investidores privados reconheçam o potencial do hidrogênio como uma fonte de energia limpa e renovável, proporcionando incentivos e políticas que apoiem esses investimentos.

Além disso, parcerias entre o setor público e privado são essenciais para facilitar o desenvolvimento da infraestrutura necessária. Programas de financiamento e colaborações interinstitucionais podem acelerar o progresso na construção de uma rede de transporte e armazenamento de hidrogênio que atenda à demanda crescente por energia limpa.

## **11 Desafios e perspectivas futuras**

### **11.1 Hidrogênio verde como vetor da economia de baixo carbono**

O hidrogênio (H<sub>2</sub>) é um vetor energético de admirável versatilidade, podendo atuar em toda a matriz energética, incluindo os setores de difícil eletrificação, a exemplo da indústria e dos transportes, (RAMOS et al., 2022). A Agência Internacional de Energia (IEA, 2019) afirma que o hidrogênio pode desempenhar um papel crucial na descarbonização da economia, particularmente em indústrias intensivas em carbono. O hidrogênio verde pode ser utilizado como matéria-prima para a produção de aço, cimento e produtos químicos, contribuindo para a descarbonização desses setores.

Assim, a importância e o impacto da produção de hidrogênio verde na economia mundial são inegáveis. A transição para uma economia baseada no hidrogênio não apenas promove a inovação tecnológica e a segurança energética, mas também gera oportunidades de emprego e investimentos. Com o apoio de políticas governamentais iniciativas do setor privado, o hidrogênio verde pode se tornar um pilar central da economia global sustentável no futuro.

A pesquisa sobre hidrogênio verde, especialmente no que se refere ao seu armazenamento, tem se beneficiado enormemente da colaboração científica. Essa dinâmica colaborativa não apenas potencializa a inovação tecnológica, mas também fortalece a capacidade das instituições de pesquisa em enfrentar os desafios complexos associados ao desenvolvimento sustentável.

## **11.2 Geração de empregos e atração de investimentos**

A produção de hidrogênio verde pode resultar na criação de milhões de empregos em setores como engenharia, pesquisa e desenvolvimento, manufatura e manutenção de infraestruturas. Segundo um relatório da McKinsey (2021), a economia global do hidrogênio pode gerar até 30 milhões de empregos até 2030. Esse impacto positivo no emprego é especialmente relevante em um momento em que a recuperação econômica pós-pandemia é uma prioridade em muitos países.

Os investimentos em hidrogênio verde também estão crescendo. A BloombergNEF (2022) estima que os investimentos globais em tecnologias de hidrogênio ultrapassem US\$ 11 trilhões até 2050. Esses investimentos não apenas estimulam o crescimento econômico, mas também facilitam a transição para uma economia de baixo carbono. Autores como Kearney (2021) argumentam que os investimentos em hidrogênio verde devem ser priorizados para alcançar as metas climáticas globais e garantir a sustentabilidade econômica.

## **11.3 Integração nas redes de energia**

Outro aspecto importante a ser considerado é a integração do hidrogênio nas redes de energia existentes. A produção de hidrogênio verde por meio da eletrólise da água, utilizando energia renovável, pode ser otimizada para se alinhar com os padrões de demanda das redes elétricas. Nørgaard et al. (2019) afirmam que essa integração pode facilitar a utilização do hidrogênio como uma forma de armazenamento de energia, permitindo que a energia gerada durante períodos de alta produção renovável seja convertida em hidrogênio e armazenada para uso posterior.

A infraestrutura de armazenamento e transporte de hidrogênio verde apresenta tanto desafios significativos quanto oportunidades promissoras. Superar esses desafios requer inovações tecnológicas, investimentos adequados e parcerias colaborativas entre os setores público e privado. À medida que o mundo avança em direção a uma economia de baixo carbono,

o desenvolvimento de uma infraestrutura robusta para o hidrogênio será fundamental para garantir que esta fonte de energia limpa desempenhe um papel crucial na matriz energética global.

#### **11.4 Impacto da pesquisa e desenvolvimento em políticas energéticas**

O avanço nas tecnologias de hidrogênio verde representa uma oportunidade significativa para transformar as políticas energéticas globais, especialmente em relação à redução das emissões de carbono e à promoção de uma economia de baixo carbono. A pesquisa e desenvolvimento (P&D) nesta área não apenas impulsionam inovações tecnológicas, mas também influenciam a formulação de políticas públicas que buscam garantir uma transição energética sustentável.

#### **11.5 A integração do hidrogênio verde nas políticas energéticas**

Sherif et al. (2020) destacam que a integração do hidrogênio verde nas estratégias energéticas é fundamental para mitigar as mudanças climáticas. A crescente evidência científica do impacto das emissões de gases de efeito estufa (GEE) tem levado governos e organizações internacionais a repensarem suas políticas energéticas. Nesse contexto, o hidrogênio verde emerge como uma solução viável, sendo produzido a partir de fontes renováveis, como a energia solar e eólica, através do processo de eletrólise.

O desenvolvimento de políticas que incentivem a produção e utilização do hidrogênio verde pode ajudar a diversificar as fontes de energia, reduzindo a dependência de combustíveis fósseis e, conseqüentemente, as emissões de carbono. Além disso, a adoção do hidrogênio como vetor energético permite a armazenagem de energia e o transporte de energia renovável de forma mais eficiente, contribuindo para a estabilidade das redes elétricas.

#### **11.6 Papel da pesquisa e desenvolvimento**

O papel da P&D é crucial para o avanço das tecnologias relacionadas ao hidrogênio verde. Investimentos em pesquisa podem levar à inovação em métodos de produção, armazenamento e transporte de hidrogênio. Segundo Wang et al. (2019), o avanço nas tecnologias de armazenamento de hidrogênio, como os nanomateriais, é um exemplo de como a pesquisa pode criar soluções mais seguras e eficientes.

Além disso, a P&D também desempenha um papel na redução dos custos associados à produção de hidrogênio verde. À medida que as tecnologias se tornam mais eficientes, os custos

de produção tendem a diminuir, tornando o hidrogênio uma alternativa mais competitiva em relação a outras fontes de energia. A redução de custos, por sua vez, facilita a implementação de políticas que incentivem a adoção do hidrogênio verde em setores como transporte, indústria e aquecimento.

### **11.7 Desafios na implementação de políticas**

Apesar das oportunidades, a implementação de políticas energéticas que favoreçam o hidrogênio verde enfrenta desafios. Um dos principais obstáculos é a necessidade de infraestrutura adequada para a produção, armazenamento e distribuição do hidrogênio. De acordo com Nørgaard et al. (2019), a construção dessa infraestrutura exige investimentos significativos e coordenação entre diferentes setores e níveis de governo.

Adicionalmente, as políticas devem ser adaptadas para levar em conta as especificidades regionais, considerando as diferentes capacidades de produção de energia renovável e a demanda por hidrogênio em cada local. A colaboração internacional e as parcerias entre governos, indústrias e instituições de pesquisa são essenciais para compartilhar conhecimentos e melhores práticas, garantindo que as políticas energéticas sejam eficazes e bem-sucedidas.

O impacto da pesquisa e desenvolvimento em políticas energéticas é evidente na forma como o hidrogênio verde está sendo integrado nas estratégias para mitigar as mudanças climáticas. As inovações tecnológicas geradas pela P&D não apenas viabilizam a produção e o uso do hidrogênio como fonte de energia, mas também moldam as políticas públicas que buscam garantir uma transição energética sustentável. À medida que os desafios são superados e as políticas se adaptam, o hidrogênio verde tem o potencial de se tornar uma peça central na matriz energética global, contribuindo para um futuro mais sustentável.

## 12 Conclusão

Este estudo abordou sobre o crescente interesse global no hidrogênio verde como alternativa energética sustentável, o qual ganhou relevância devido às suas características de alta densidade energética e à contribuição para a descarbonização da economia.

A análise bibliométrica revelou que o número de publicações e citações sobre o tema aumentou significativamente nos últimos anos, impulsionado por políticas ambientais e avanços tecnológicos. Identificou-se os países asiáticos representados pelos países China, Irã, Arabia Saudita, Coreia do Sul e Índia lideram as pesquisas e colaborações internacionais, enquanto instituições e autores renomados têm contribuído substancialmente para o avanço dessa área.

O estudo das palavras chaves identificou a ocorrência de palavras chaves como armazenamento, hidrogênio, energia, materiais que estão sendo usados para armazenamento de hidrogênio verde. Foram discutidas as principais tecnologias de armazenamento, como hidrogênio comprimido, líquido e no estado sólido, cada uma com suas vantagens e limitações. Observou-se que o desenvolvimento de novos materiais, como nanomateriais, tem potencial para superar desafios técnicos, oferecendo alternativas viáveis e seguras para o armazenamento de hidrogênio verde.

Em conclusão, o hidrogênio verde desempenha um papel crucial na transição para uma economia de baixo carbono e apresenta um potencial significativo para transformar o setor energético global. Este estudo contribui para a compreensão das tendências e colaborações no campo do hidrogênio verde, reforçando a importância de uma abordagem integrada e colaborativa para superar os desafios técnicos e promover o desenvolvimento sustentável.

## Referências

- CARIBE, N. F. **REDENÇÃO-CE 2023 NONTCHENATCH FERREIRA CARIBE ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA AVANÇADA DA EVOLUÇÃO CIENTÍFICA.** [s.l: s.n.].
- CAVALCANTE, I. O. et al. Evolving sustainable energy technologies and assessments through global research networks: advancing the role of blue hydrogen for a cleaner future. **RSC Sustainability**, v. 2, n. 2, p. 348–368, 13 dez. 2023.
- DANTON, P. et al. **CADEIA PRODUTIVA DO HIDROGÊNIO VERDE: UMA ANÁLISE DOS MÉTODOS DE ARMAZENAMENTO.** [s.l: s.n.].
- DARI, D. N. et al. **An Updated Review of Recent Applications and Perspectives of Hydrogen Production from Biomass by Fermentation: A Comprehensive Analysis. Biomass (Switzerland)** Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI), , 1 mar. 2024.
- DE CASTRO BIZERRA, V. et al. **Opportunities for cleaner leather processing based on protease enzyme: Current evidence from an advanced bibliometric analysis. Renewable and Sustainable Energy Reviews** Elsevier Ltd, , 1 mar. 2024.
- DILLMAN, K. J.; HEINONEN, J. A ‘just’ hydrogen economy: A normative energy justice assessment of the hydrogen economy. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 167, p. 112648, 1 out. 2022.
- DOS SANTOS PUGA, M.; OLORTIGA ASENCIOS, Y. J. Avanços e limitações da produção, armazenamento e transporte de hidrogênio verde. **Latin American Journal of Energy Research**, v. 10, n. 2, p. 74–93, 28 dez. 2023.
- DUTTA, S. A review on production, storage of hydrogen and its utilization as an energy resource. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, v. 20, n. 4, p. 1148–1156, 25 jul. 2014.
- FERREIRA GAMBA, A. **UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA CENTRO DE CIÊNCIAS FÍSICAS E MATEMÁTICAS PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM QUÍMICA ARMAZENAMENTO E LIBERAÇÃO DE HIDROGÊNIO: HIDRÓLISE CATALÍTICA DO BORO-HIDRETO DE SÓDIO EM CONDIÇÕES BRANDAS PARA APLICAÇÃO ESTACIONÁRIA EM PROTÓTIPO DE PEMFC.** [s.l: s.n.].
- KOVAČ, A.; PARANOS, M.; MARCIUŠ, D. Hydrogen in energy transition: A review. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 46, n. 16, p. 10016–10035, 3 mar. 2021.
- MEHO, L. I.; AKL, E. A. **Using Bibliometrics to Detect Unconventional Authorship Practices and Examine Their Impact on Global Research Metrics.** [s.l: s.n.].
- MUELLER DE LARA, D.; RICHTER, M. F. **HIDROGÊNIO VERDE: A FONTE DE ENERGIA DO FUTURO GREEN HYDROGEN: THE ENERGY SOURCE OF THE FUTURE** *Novos Cadernos NAEA.* [s.l: s.n.].

MUELLER DE LARA, D.; RICHTER, M. F. **HIDROGÊNIO VERDE: A FONTE DE ENERGIA DO FUTURO GREEN HYDROGEN: THE ENERGY SOURCE OF THE FUTURE** *Novos Cadernos NAEA*. [s.l: s.n.].

NIKOLAIDIS, P.; POULLIKKAS, A. A comparative overview of hydrogen production processes. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 67, p. 597–611, 1 jan. 2017.

RADTKE CANEPPELE, N. et al. A utilização do software VOSviewer em Pesquisas Científicas. **Revista Ibero-Americana de Estratégia**, v. 22, n. 1, p. e24970, 5 set. 2023.

RAMOS, C. C. et al. **Financiamento internacional da economia do hidrogênio: uma visão a partir dos países importadores**. Editora Edgard Blucher, Ltda., 27 maio 2022.

RODELLA, F. H. C. **UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA CAMPUS FLORIANÓPOLIS DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL CURSO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL**. [s.l: s.n.].

SMITH, C.; HILL, A. K.; TORRENTE-MURCIANO, L. Current and future role of Haber-Bosch ammonia in a carbon-free energy landscape. **Energy and Environmental Science**, v. 13, n. 2, p. 331–344, 1 fev. 2020.

WALTMAN, L.; VAN ECK, N. J.; NOYONS, E. C. M. A unified approach to mapping and clustering of bibliometric networks. **Journal of Informetrics**, v. 4, n. 4, p. 629–635, 1 out. 2010.

WOODS, P.; BUSTAMANTE, H.; AGUEY-ZINSOU, K. F. The hydrogen economy - Where is the water? **Energy Nexus**, v. 7, p. 100123, 1 set. 2022.

(WALTMAN; VAN ECK; NOYONS, 2010)DANTON, P. et al. **CADEIA PRODUTIVA DO HIDROGÊNIO VERDE: UMA ANÁLISE DOS MÉTODOS DE ARMAZENAMENTO**. [s.l: s.n.].

DUTTA, S. A review on production, storage of hydrogen and its utilization as an energy resource. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, v. 20, n. 4, p. 1148–1156, 25 jul. 2014.

FALCONE, P. M.; HIETE, M.; SAPIO, A. Hydrogen economy and sustainable development goals: Review and policy insights. **Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry**, v. 31, p. 100506, 1 out. 2021.

HIRAKAWA, H. et al. **SUPPORTING INFORMATION Photocatalytic Conversion of Nitrogen to Ammonia with Water on Surface Oxygen Vacancies of Titanium Dioxide**. [s.l: s.n.].

- HOSSEINI, S. E.; WAHID, M. A. Hydrogen production from renewable and sustainable energy resources: Promising green energy carrier for clean development. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 57, p. 850–866, 1 maio 2016.
- KOVAČ, A.; PARANOS, M.; MARCIUŠ, D. Hydrogen in energy transition: A review. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 46, n. 16, p. 10016–10035, 3 mar. 2021.
- PEREIRA, J. et al. Hydrogen Production, Transporting and Storage Processes—A Brief Review. **Clean Technologies**, v. 6, n. 3, p. 1260–1313, 18 set. 2024.
- RECIFE, C. **INSTITUTO FEDERAL DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE PERNAMBUCO**. [s.l: s.n.].
- RECIFE, C. **INSTITUTO FEDERAL DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE PERNAMBUCO**. [s.l: s.n.].
- SMITH, C.; HILL, A. K.; TORRENTE-MURCIANO, L. Current and future role of Haber-Bosch ammonia in a carbon-free energy landscape. **Energy and Environmental Science**, v. 13, n. 2, p. 331–344, 1 fev. 2020.
- WANG, F. et al. Technologies and perspectives for achieving carbon neutrality. **The Innovation**, v. 2, n. 4, p. 100180, 28 nov. 2021.
- WENG, Q. et al. **Functionalized hexagonal boronitride nanomaterials: Emerging properties and applications**. **Chemical Society Reviews** Royal Society of Chemistry, , 21 jul. 2016.
- YU, X.-F. et al. **Supporting Information Monolayer Ti<sub>2</sub>CO<sub>2</sub>: A Promising Candidate for NH<sub>3</sub> Sensor or Capturer with High Sensitivity and Selectivity**. [s.l: s.n.].
- BORGMAN, C. L. **The digital future is now: a call to action for the humanities**. *Computers and the Humanities*, v. 41, n. 2, p. 177-186, 2007. DOI: 10.1007/s10579-007-9030-5.
- GLÄNZEL, W. **Bibliometrics as a research field: A course on theory and application of bibliometric indicators**. Budapest: CourseHandouts, 2003.
- GUPTA, P.; JAIN, R.; SHARMA, A. **Collaborative research in renewable energy: Insights from hydrogen storage technology**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 143, p. 110874, 2021.
- HAO, Y.; LIU, S.; WANG, Z. **Research collaboration and its impact on hydrogen energy storage research**. *Journal of Cleaner Production*, v. 258, p. 120840, 2020.

LI, M.; ZHANG, H.; SUN, Y. **The impact of key authors on the development of hydrogen energy research**. Energy Reports, v. 6, p. 282-291, 2020.

MORADI, R.; GROTH, K. M. **Hydrogen storage and delivery: Review of the state of the art technologies and risk and reliability analysis**. International Journal of Hydrogen Energy, v. 44, n. 23, p. 12254-12269, 2019.

NØRGAARD, J. et al. **Green hydrogen: storage and transport**. International Journal of Hydrogen Energy, v. 44, n. 29, p. 129-139, 2019. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2019.02.012.

SHERIF, S. A.; BARBIR, F.; VEZIROGLU, T. N. **Principles of hydrogen energy production, storage, and utilization**. CRC Press, 2020.

URSUS, A. E.; CHEN, Y.; WEISSENRIEDER, M. **Hydrogen energy: Principles, production, and applications**. Springer, 2021.

VAN RAAN, A. F. J. **Measuring science: Capita selecta of current main issues**. In: MOED, H. F.; GLÄNZEL, W.; SCHMOCH, U. (Eds.). Handbook of Quantitative Science and Technology Research. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2004. p. 19-50.

VAN ECK, N. J.; WALTAN, L. **Software VOSviewer for visualizing and analyzing scientific networks**. Scientometrics, v. 84, n. 2, p. 523-538, 2010.

WANG, Y.; WANG, X.; CHEN, J. **Citations and collaboration in hydrogen energy storage research: A bibliometric approach**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 104, p. 299-309, 2019.

WENG, Q. et al. **Functionalized hexagonal boron nitride nanomaterials: Emerging properties and applications**. Chemical Society Reviews, v. 45, n. 2, p. 398-415, 2016.

ZHANG, W.; XIE, H.; WANG, Z.; LUO, G. **Hydrogen energy storage: State-of-the-art and prospects**. Journal of Power Sources, v. 396, p. 305-320, 2018.

ZHANG, X.; YANG, Y.; CHEN, D. **Impact of international collaboration on hydrogen storage research and development**. Energy Policy, v. 128, p. 10-20, 2019.

ZHANG, X.; ET AL. **Performance evaluation of hydrogen storage systems: A review.** *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 119, p. 101-113, 2020. DOI: 10.1016/j.rser.2019.109562.

AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA (IEA). *The Future of Hydrogen*. 2019.

BLOOMBERGNEF. *Hydrogen market outlook*. 2022.

BORGMAN, C. L. The digital future is now: a call to action for the humanities. *Computers and the Humanities*, v. 41, n. 2, p. 177-186, 2007. DOI: 10.1007/s10579-007-9030-5.

BUDINIS, S. et al. The role of hydrogen and fuel cells in the global energy transition. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 45, n. 15, p. 9139-9147, 2020.

CHAHINE, R. et al. Advanced Materials for Hydrogen Storage. *Journal of Alloys and Compounds*, v. 688, p. 691-703, 2016.

CHENG, Y.; HAMED, T. Renewable energy and carbon capture and storage: A solution for a sustainable energy future. *Energy Reports*, v. 7, p. 128-140, 2021.

ESSWEIN, D.; FRIEDL, G. Hydrogen energy and the potential for renewable energy integration. *Journal of Sustainable Energy Systems*, v. 12, p. 59-72, 2020.

GLÄNZEL, W. *Bibliometrics as a research field: A course on theory and application of bibliometric indicators*. Budapest: CourseHandouts, 2003.

GUPTA, P.; JAIN, R.; SHARMA, A. Collaborative research in renewable energy: Insights from hydrogen storage technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 143, p. 110874, 2021.

H2 VIEW. *Why hydrogen is crucial for energy independence*. 2021.

IRENA. *Hydrogen: A renewable energy perspective*. International Renewable Energy Agency, 2020.

KEARNEY. *The future of hydrogen: Key trends and considerations*. 2021.

- KORKMAZ, E. et al. Hydrogen Storage in Carbon-Based Materials: Current Status and Future Prospects. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 42, n. 32, p. 20558-20574, 2017.
- LI, H. et al. Hydrogen Storage in Nanostructured Materials: A Review. *Materials Today*, v. 17, n. 4, p. 199-205, 2014.
- LI, M.; ZHANG, H.; SUN, Y. The impact of key authors on the development of hydrogen energy research. *Energy Reports*, v. 6, p. 282-291, 2020.
- LIU, J. et al. The Role of Carbon Nanomaterials in Hydrogen Storage. *Carbon*, v. 112, p. 458-474, 2017.
- McKinsey & Company. The hydrogen economy: How the world can make the transition. 2021.
- MORADI, A.; GROTH, M. Review of Hydrogen Storage Technologies: An Overview of Their Capabilities and Limitations. *Energy & Fuels*, v. 33, n. 12, p. 12257-12269, 2019.
- MORADI, R.; GROTH, K. M. Hydrogen storage and delivery: Review of the state of the art technologies and risk and reliability analysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 44, n. 23, p. 12254-12269, 2019.
- NØRGAARD, T.; BAK, T.; THOMSEN, A. Opportunities for Hydrogen Storage and Transport: Investment Needs and Technological Challenges. *Renewable Energy*, v. 139, p. 287-295, 2019.
- SHERIF, S.; BARBIR, F.; VEZIROGLU, T. N. The Role of Hydrogen in the Energy Transition: Global Perspectives and Prospects. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 45, n. 18, p. 9951-9962, 2020.
- TIMMERS, R. A.; MORENO, J.; MASSONE, L. Economic and environmental impact of hydrogen technologies: A global perspective. *Renewable Energy Review*, v. 30, p. 109-123, 2021.
- VAN ECK, N. J.; WALTAN, L. Software VOSviewer for visualizing and analyzing scientific networks. *Scientometrics*, v. 84, n. 2, p. 523-538, 2010.

VAN RAAN, A. F. J. Measuring science: Capita selecta of current main issues. In: MOED, H. F.; GLÄNZEL, W.; SCHMOCH, U. (Eds.). *Handbook of Quantitative Science and Technology Research*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2004. p. 19-50.

WANG, Z.; WANG, Y.; CHEN, H. Mapping the Development of Hydrogen Storage Technologies: A Bibliometric Analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 104, p. 302-314, 2019.

WENG, W. et al. Functionalized Boron Nitride Nanosheets for Hydrogen Storage. *Nanoscale*, v. 8, n. 1, p. 398-406, 2016.

ZHANG, Z. et al. Enhancing Hydrogen Storage Performance of Nanomaterials. *Advanced Energy Materials*, v. 8, n. 2, p. 307-319, 2018.

ZHANG, X.; YANG, Y.; CHEN, D. Impact of international collaboration on hydrogen storage research and development. *Energy Policy*, v. 128, p. 10-20, 2019.

ZÜTTEL, A. Hydrogen Storage Methods. *Naturwissenschaften*, v. 90, n. 4, p. 157-172, 2003.