



ConBRepro

XIV CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

I CIGELUBRA

Congresso Internacional de Gestão e Engenharia Luso-Brasileiro

04 a 06 de dezembro de 2024

Energias Limpas nas Engenharias

HIDROGÊNIO VERDE: UMA ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA A PARTIR DE SUA GÊNESE

Renan Azevedo da Luz,

DAENP - UTFPR Campus Ponta Grossa

Pedro Henrique Ribeiro Timoteo

DAENP - UTFPR Campus Ponta Grossa

Jaqueline Fonseca Rodrigues

PPGEP - UTFPR Campus Ponta Grossa

William de Queiroz Timoteo Junior

DAENP UTFPR Campus Ponta Grossa

Regina Negri Pagani

DAENP/ PPGEP - UTFPR; GOVCOPP, Universidade de Aveiro, Portugal

Resumo: O hidrogênio verde tem emergido como uma solução promissora para a transição energética sustentável, oferecendo uma alternativa viável para reduzir as emissões de carbono e promover o uso de fontes renováveis de energia. Essa tecnologia é vista como essencial para alcançar as metas globais de descarbonização, especialmente em setores difíceis de eletrificar, como o transporte pesado e a indústria química. O presente estudo tem como objetivo mapear os países, setores industriais e autores que mais contribuem para a pesquisa sobre hidrogênio verde, proporcionando uma visão detalhada das tendências e dinâmicas atuais nesse campo emergente. A coleta dos dados foi realizada nas bases de dados Web of Science e Scopus. Os resultados revelam que países como China, Índia, Alemanha, Japão e Estados Unidos lideram em volume de publicações nessa área. Setores industriais como energia, transporte e indústria química se destacam como os mais ativos na aplicação e estudo do hidrogênio verde. Este artigo contribui para nortear futuras pesquisas, em profundidade, neste tema que tem demonstrado crescimento exponencial em suas pesquisas, revelado por meio dos crescentes números de artigos.

Palavras-chave: Hidrogênio Verde, Análise Bibliométrica, Transição Energética Sustentável.

GREEN HYDROGEN: A BIBLIOMETRIC ANALYSIS BASED ON ITS GENESIS

Abstract: Green hydrogen has emerged as a promising solution for the sustainable energy transition, offering a viable alternative to reduce carbon emissions and promote the use of renewable energy sources. This technology is seen as essential to achieve global decarbonization goals, especially in sectors that are difficult to electrify, such as heavy transport and the chemical industry. This study aims to map the countries, industrial sectors and authors that contribute most to green hydrogen research, providing a detailed view of current trends and dynamics in this emerging field. Data collection was carried out in the Web of Science and eScopus databases. The results reveal that countries such as China, India, Germany, Japan and the United States lead in the volume of publications in this area. Industrial sectors such as energy, transport and the

chemical industry stand out as the most active in the application and study of green hydrogen. This article contributes to guiding future in-depth research on this topic that has shown exponential growth in its research, revealed through the increasing number of articles.

Keywords: Green Hydrogen, Bibliometric Analysis, Sustainable Energy Transition.

1. Introdução

O hidrogênio é considerado uma fonte de energia promissora no contexto da transição energética e do desenvolvimento sustentável. Por ser o elemento mais abundante no universo, ele pode ser produzido a partir de várias fontes, incluindo a eletrólise da água, utilizando energia renovável. O hidrogênio é visto como uma alternativa limpa aos combustíveis fósseis, pois sua queima libera apenas vapor d'água, sem emissão de gases de efeito estufa.

Existem diversas categorias de hidrogênio, a partir da fonte de sua produção. O hidrogênio verde é o mais conhecido e mencionado na literatura. Produzido a partir da eletrólise da água utilizando fontes de energia renováveis, é amplamente reconhecido como um vetor energético crucial para a transição global rumo a um futuro sustentável (IRENA, 2020). À medida que as preocupações com as mudanças climáticas e a dependência de combustíveis fósseis se intensificam, a adoção do hidrogênio verde tem ganhado destaque nas agendas de pesquisa e políticas energéticas ao redor do mundo (Bocken *et al.*, 2014; Parra *et al.*, 2019).

Neste contexto, colocamos a seguinte pergunta de pesquisa: **Quais são os países, setores industriais e autores que mais estão contribuindo para a pesquisa sobre hidrogênio verde?**

Este estudo é justificado pela necessidade de uma visão ampla sobre os esforços globais em torno do hidrogênio verde, um elemento chave para alcançar metas de sustentabilidade e neutralidade de carbono. Compreender quais países, setores e autores estão liderando a pesquisa pode orientar decisões estratégicas e políticas, promover colaborações eficazes e direcionar investimentos para áreas com maior potencial de impacto.

2. Referencial Teórico

2.1 Tipos de hidrogênio

O hidrogênio, embora seja um elemento único, pode ser classificado em diferentes tipos com base em como é produzido, o que tem impacto direto em sua sustentabilidade e pegada ambiental. A seguir serão abordados os tipos existentes.

2.2 Hidrogênio cinza

O hidrogênio cinza é um tipo de hidrogênio produzido a partir da queima de combustíveis fósseis, especialmente o gás natural, por meio de um processo conhecido como reforma a vapor (Steam Methane Reforming – SMR). Nesse processo, o metano, principal componente do gás natural, reage com vapor de água em alta temperatura e pressão, resultando na liberação de grandes quantidades de dióxido de carbono (CO₂) na atmosfera. Essa produção é responsável por uma emissão considerável de gases de efeito estufa, intensificando o aquecimento global. A cada tonelada de hidrogênio cinza gerada, cerca de dez toneladas de CO₂ são emitidas. Apesar do impacto ambiental, o hidrogênio cinza domina o mercado mundial, com 80 milhões de toneladas produzidas anualmente, principalmente para a indústria química e o refino de petróleo. Mais de 80% da produção é utilizada para sintetizar amônia e seus derivados, essenciais para a agricultura (Azevedo, J).

2.3 Hidrogênio Azul

O hidrogênio azul é obtido através da transformação do metano presente no gás natural, num procedimento similar ao empregado na fabricação de hidrogênio cinza, porém com a inclusão da captura e armazenamento de carbono (CCS). Apesar de essa tecnologia ser comumente apresentada como uma alternativa de baixas emissões, os estudos indicam que ela ainda tem um impacto significativo no aquecimento global. A absorção de carbono não é capaz de erradicar totalmente as emissões, apresentando uma eficácia média de 85%. Adicionalmente, o aumento na demanda por gás natural para alimentar o processo de captura leva a um aumento nas emissões de metano, um potente gás de efeito estufa (Howarth & Jacobson, 2021).

A avaliação detalhada das emissões de gases de efeito estufa do hidrogênio azul indica que, levando em conta tanto o dióxido de carbono quanto o metano não queimado, as emissões totais do hidrogênio azul são apenas de 9% a 12% inferiores às do hidrogênio cinza. Em certas situações, a queima direta de gás natural ou carvão para produzir calor pode ter um impacto climático 20% superior ao do hidrogênio azul. Principalmente, essas emissões são causadas pelo metano que escapa, cuja presença no ciclo de produção de hidrogênio azul intensifica o impacto ambiental dessa tecnologia (Howarth & Jacobson, 2021).

Portanto, longe de ser uma solução "limpa", o hidrogênio azul apresenta uma pegada ambiental significativa, colocando em dúvida sua viabilidade como alternativa para a mitigação das mudanças climáticas (Howarth & Jacobson, 2021).

2.4 Hidrogênio Verde

O hidrogênio verde é produzido por meio da eletrólise da água, utilizando exclusivamente fontes de energia renováveis, como solar ou eólica. Esse processo é considerado o mais sustentável entre as formas de produção de hidrogênio, pois não emite dióxido de carbono durante sua geração, o que o torna essencial para os esforços de descarbonização globais. Diferente de outras formas de hidrogênio, como o cinza ou azul, que dependem de combustíveis fósseis e envolvem emissões de gases de efeito estufa, o hidrogênio verde utiliza eletricidade limpa para dividir as moléculas de água em hidrogênio e oxigênio, sem causar impactos ambientais significativos (Liu et al., 2022).

2.5 Hidrogênio Marrom

Segundo Drahota et al. (2002), o hidrogênio marrom, também chamado de hidrogênio preto por alguns autores, é produzido pela gaseificação do carvão, um processo de alta concentração de carbono que produz grandes volumes de dióxido de carbono (CO₂) e outros gases nocivos. Esta abordagem emprega combustíveis fósseis, representando uma alternativa econômica, porém altamente insustentável, uma vez que contribui para o crescimento das emissões de gases de efeito estufa e para a intensificação das alterações climáticas. Este processo, além de intensificar a dependência em fontes de energia não renováveis, apresenta restrições ambientais. Isso ocorre porque, sem sistemas de captura e armazenamento de carbono (CCS), a emissão de CO₂ intensifica o aquecimento global, afetando a qualidade do ar e acelerando o esgotamento dos recursos naturais. Dessa forma, embora o hidrogênio marrom possa ser uma opção acessível economicamente, ele apresenta uma pegada de carbono elevada, tornando-o insustentável em longo prazo para uma transição energética focada na sustentabilidade (Drahota et al., 2002).

2.6 Hidrogênio Turquesa

A produção de hidrogênio turquesa ocorre através da pirólise do metano, um procedimento que transforma o gás natural em hidrogênio (H₂) e carbono sólido, sem a liberação de dióxido de carbono. Um dos maiores benefícios deste procedimento é a simplicidade: ao invés de exigir redes complexas para a captura e armazenamento de

CO₂, ele utiliza a infraestrutura já existente para o transporte e armazenamento de gás natural. O carbono gerado é um produto secundário valioso, empregado em mercados de alto valor, como na fabricação de anodos e grafite. Contudo, a sustentabilidade econômica em grande escala está atrelada à procura por esse carbono puro, que ainda é bastante restrita. Em áreas onde o armazenamento de CO₂ é difícil, o hidrogênio turquesa surge como uma alternativa promissora para a descarbonização, especialmente em sistemas energéticos que buscam evitar grandes expansões em redes de transmissão de eletricidade e CO₂ (Teso et al., 2024).

2.7 Hidrogênio Musgo

Segundo Mayaba et al. (2002) e Moreira (T), a obtenção do hidrogênio musgo ocorre a partir de biomassa ou biocombustíveis, por meio de processos como a gaseificação, transformações catalíticas e biodigestão anaeróbica. Ele se distingue de outros tipos de hidrogênio verde pelo uso de compostos orgânicos presentes na biomassa, que são transformados em hidrogênio através da fermentação anaeróbica. Neste procedimento, microrganismos degradam compostos orgânicos em um meio sem oxigênio, produzindo hidrogênio, dióxido de carbono (CO₂) e metano. Este hidrogênio também gera um "efeito oxidativo" de peróxido de hidrogênio (H₂O₂) ao ser utilizado em sistemas biológicos, como acontece durante a reidratação do musgo *Atrichum androgynum*. Este peróxido de hidrogênio (H₂O₂) atua na proteção contra patógenos, impedindo o desenvolvimento de esporos de fungos e bactérias. A severidade desse surto pode ser influenciada pela luz e por reguladores hormonais, como o ácido abscísico, que modula a produção de H₂O₂ e aumenta a resistência ao estresse ambiental (Mayaba et al., 2002).

Ademais, o hidrogênio musgo tem uma grande capacidade para se tornar uma fonte de energia sustentável, particularmente quando ligado à captura e armazenamento de carbono (CCS), o que pode tornar o processo de produção "negativo em carbono". Significa que a produção de hidrogênio de musgo pode acumular mais CO₂ do que emite, auxiliando na mitigação das alterações climáticas e apresentando-o como uma opção promissora e competitiva na transição energética (Moreira, T).

2.8 Hidrogênio Rosa

O hidrogênio rosa é fabricado através da eletrólise da água, com o uso da eletricidade proveniente de centrais nucleares. Este procedimento se assemelha ao do hidrogênio verde, que emprega a eletrólise, porém, a energia é proveniente de fontes renováveis, como a solar e a eólica. A principal distinção reside na origem da energia: enquanto o hidrogênio verde se baseia na instabilidade das renováveis, o hidrogênio rosa se favorece da produção constante e estável das usinas nucleares. A aplicação de energia nuclear na eletrólise possibilita que o hidrogênio rosa alcance emissões líquidas de gases de efeito estufa próximas de zero, tornando-o uma opção atraente para a descarbonização em grande escala (Fernández-Arias et al., 2024).

Além disso, o hidrogênio rosa proporciona o benefício de utilizar a infraestrutura já existente nas usinas nucleares, o que pode diminuir os gastos de construção e funcionamento. O calor produzido no processo nuclear de fissão, que normalmente é desperdiçado, pode ser empregado para aprimorar a eficácia do processo de eletrólise, diminuindo ainda mais a demanda por energia externa. O hidrogênio rosa tem aplicações variadas, abrangendo a indústria, o transporte e o armazenamento de energia, auxiliando na estabilidade da rede elétrica em sistemas que se baseiam em fontes de energia intermitentes, como solar e eólica (Fernández-Arias et al., 2024).

2.9 Hidrogênio Amarelo

O hidrogênio amarelo é obtido através da eletrólise da água, utilizando apenas eletricidade proveniente de fontes solares, o que o torna uma alternativa renovável e de

baixo impacto ambiental. Este procedimento consiste na quebra da molécula de água em hidrogênio (H₂) e oxigênio (O₂) através da aplicação de uma corrente elétrica, sem a liberação direta de poluentes. Contudo, existe uma definição alternativa que afirma que o hidrogênio amarelo é produzido a partir de uma combinação de fontes de energia, que podem englobar tanto energia renovável, como a solar e eólica, quanto energia derivada da combustão de combustíveis fósseis. Conforme a fonte de energia empregada, o hidrogênio amarelo pode ter uma vida útil sustentável ou ser poluente, o que impacta sua contribuição para a descarbonização mundial. Sua principal vantagem é a produção limpa quando alimentado por energia solar, mas pode ter impacto negativo se produzido com fontes fósseis (Moreira, T.).

2.10 Hidrogênio Branco

O hidrogênio branco, também chamado de hidrogênio natural, é uma fonte de energia renovável que se origina naturalmente na Terra, como resultado de reações químicas no subsolo. Ele foi descoberto recentemente na área da Lorena, na França, durante estudos que inicialmente tinham como objetivo investigar o gás metano. As pesquisas indicaram que a concentração de hidrogênio branco cresce à medida que a escavação avança, com depósitos situados a aproximadamente 3 mil metros de profundidade. Ademais da França, existem evidências de depósitos de hidrogênio branco em outras áreas globais, incluindo Mali, Estados Unidos, Austrália e Rússia. Este combustível é visto como uma opção energética promissora, particularmente para a Europa, que procura diversificar suas fontes de energia após a crise energética desencadeada pelo conflito entre Ucrânia e Rússia. O "Pacote do Clima" já foi aprovado pela União Europeia, destinando 800 milhões de euros ao projeto "Banco do Hidrogênio", para fomentar o uso do hidrogênio em indústrias e países do bloco (da Energia, 2024).

Por ser um dos mais abordados na literatura, este trabalho traz um aprofundamento neste tipo de hidrogênio.

2.11 Hidrogênio Verde: Evolução

A evolução do hidrogênio verde está intimamente ligada às crescentes preocupações com as mudanças climáticas e a necessidade de encontrar fontes de energia sustentável. Segundo IRENA (2020), o hidrogênio verde tem potencial para reduzir significativamente as emissões de CO₂, especialmente em setores difíceis de descarbonizar, como a indústria pesada e o transporte de longa distância. A pesquisa sobre hidrogênio verde começou a ganhar tração no início dos anos 2000, mas foi na última década que se observou um aumento substancial no interesse acadêmico e industrial, impulsionado por avanços tecnológicos e políticas públicas favoráveis (IEA, 2019).

2.12 Produção do HV e Aplicações

O hidrogênio verde é produzido principalmente através da eletrólise da água, um processo que utiliza eletricidade proveniente de fontes renováveis, como solar e eólica, para separar a água em hidrogênio e oxigênio (Zhang *et al.*, 2020). Existem várias tecnologias de eletrólise, incluindo a eletrólise alcalina, a eletrólise de membrana de troca de prótons (PEM) e a eletrólise de óxido sólido, cada uma com suas próprias vantagens e desafios (Acar e Dincer, 2019).

As aplicações do hidrogênio verde são diversas e abrangem vários setores. No setor energético, o hidrogênio verde pode ser utilizado para armazenar energia renovável intermitente e fornecer eletricidade de backup. Na indústria, pode substituir o hidrogênio cinza, produzido a partir de combustíveis fósseis, em processos como a refinaria de petróleo e a produção de amônia para fertilizantes (Bockris, 2002). No setor de transporte, o hidrogênio verde é utilizado em células de combustível para veículos elétricos de célula

a combustível (FCEVs), oferecendo uma alternativa limpa e eficiente aos combustíveis fósseis (Ogden, 1999).

3. Desafios

Apesar do seu potencial, o hidrogênio verde enfrenta vários desafios que precisam ser superados para sua adoção em larga escala. Um dos principais desafios é o custo de produção, que ainda é significativamente mais alto do que o hidrogênio produzido a partir de combustíveis fósseis (IRENA, 2020). O desenvolvimento de tecnologias de eletrólise mais eficientes e a redução dos custos das energias renováveis são essenciais para tornar o hidrogênio verde economicamente viável (Staffell *et al.*, 2019).

Outro desafio é a infraestrutura necessária para a produção, armazenamento e distribuição do hidrogênio verde. A construção de uma rede de distribuição adequada requer investimentos substanciais e coordenação entre diferentes setores e governos (Deloitte, 2020). Além disso, há desafios técnicos relacionados ao armazenamento e transporte de hidrogênio, devido à sua baixa densidade energética e à necessidade de condições específicas de pressão e temperatura (Léon, 2008).

Por fim, há desafios regulatórios e de aceitação pública. A implementação de políticas que incentivem a produção e uso de hidrogênio verde, bem como a conscientização sobre os benefícios ambientais e econômicos dessa tecnologia, são cruciais para sua adoção generalizada (Parra *et al.*, 2019).

4. Materiais e Métodos

Para a realização da pesquisa, foram seguidas as seguintes etapas:

- Identificação e Seleção de Fontes Bibliográficas: A pesquisa sobre hidrogênio verde foi realizada utilizando bases de dados Web of Science, Scopus, e Sciencedirect (sendo ScienceDirect usada somente nos dados de evolução das publicações). A palavra-chave empregada na busca foi "Green Hydrogen". - Coleta dos Dados: Após a seleção das fontes bibliográficas, os dados foram coletados e organizados em uma matriz que incluía informações sobre: (a) Categorias de publicações, (b) Evolução das publicações, (c) Principais periódicos, (d) Países que pesquisam sobre hidrogênio verde, (e) Autores mais influentes no tema, e (f) Setores que estudam as aplicações do Hidrogênio Verde.

- Organização e Análise dos Dados: Os dados coletados nas bases foram consolidados em planilhas por grupos de informações, e posteriormente organizados em gráficos.

- Apresentação dos Resultados: Os resultados serão apresentados em forma de gráficos, que ilustram a distribuição geográfica da pesquisa, as redes de colaboração entre países e instituições, e as áreas de maior atividade científica. Além disso, foram elaboradas tabelas resumindo os setores industriais mais envolvidos e os autores mais prolíficos e influentes. A síntese final dos resultados oferece uma visão abrangente sobre o estado atual da pesquisa em hidrogênio verde, destacando as principais contribuições e identificando áreas que necessitam de maior investigação.

Os dados extraídos foram analisados quantitativamente, o que permitiu identificar padrões de colaboração, influências no campo e a distribuição geográfica da pesquisa. Além disso, uma análise de conteúdo qualitativa foi realizada para destacar as principais tendências, desafios e lacunas na pesquisa sobre hidrogênio verde, oferecendo uma perspectiva crítica sobre o desenvolvimento dessa tecnologia.

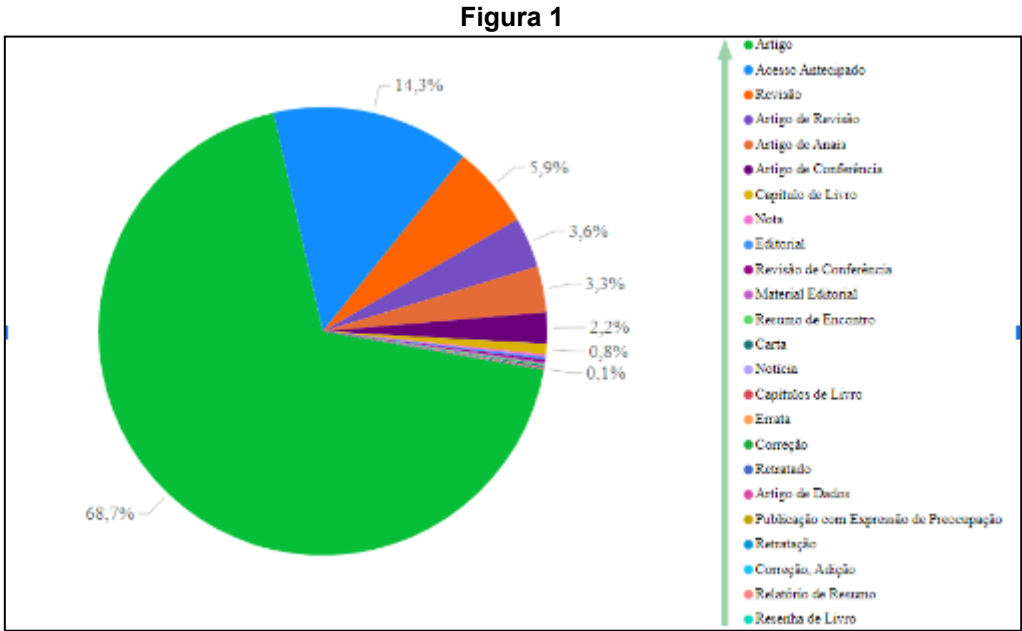
5. Resultados e Discussão

5.1 Categorias de publicações

A Figura 1 mostra como os tipos de publicações sobre hidrogênio verde se distribuem. Com 72.377 publicações, a categoria "Artigo" representa a maioria das publicações

originais do campo. Em seguida, "Acesso Antecipado" aparece com 15.058 publicações, enfatizando a necessidade e o desejo de divulgar novas descobertas rapidamente.

O "Artigo de Revisão" (3.823) e a "Revisão" (6.254 publicações) são outros formatos pertinentes, indicando a necessidade de sintetizar o conhecimento acumulado sobre o assunto. Além disso, artigos como "Artigo de Anais" (3.499) e "Artigo de Conferência" (2.367) são comuns em eventos acadêmicos, mostrando discussões ativas em congressos e seminários.



Fonte: Autoria própria (2024)

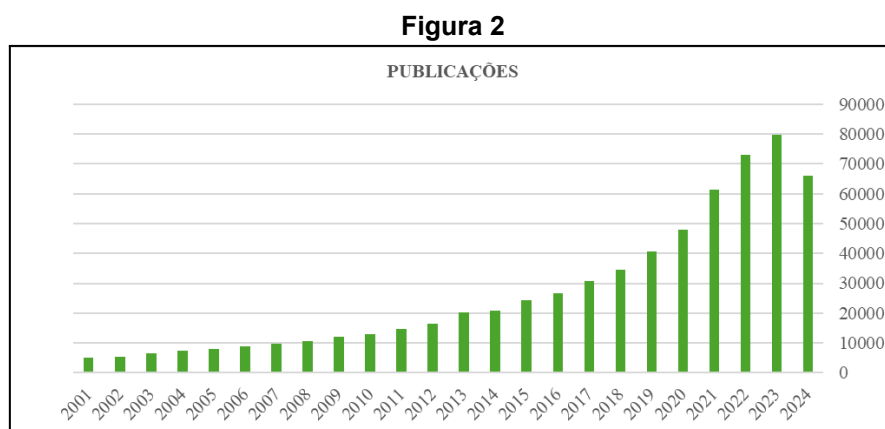
Figura 1: Número de publicações por categoria sobre o hidrogênio verde. Fonte: Autoria Própria (2024).

Essas informações mostram que o campo do hidrogênio verde é amplo, com um foco claro em artigos originais e revisões. Isso ajuda a consolidar e expandir o conhecimento sobre essa tecnologia, que é vital para a transição energética.

5.2 Evolução das publicações

O crescimento das publicações sobre hidrogênio verde é mostrado na figura 2. O número de publicações entre 2001 e 2010 foi pequeno, refletindo um interesse inicial limitado. O crescimento acelerou lentamente a partir de 2011, alcançando 20.196 publicações em 2013.

O aumento mais notável ocorreu em 2019, quando o número de publicações aumentou de 40.595 para 66.023 em 2024. Esse aumento exponencial é resultado das políticas globais de sustentabilidade e da urgência de passar para fontes de energia mais limpas. Na última década, o hidrogênio verde tornou-se um objetivo central nas agendas de pesquisa, desenvolvimento e inovação.

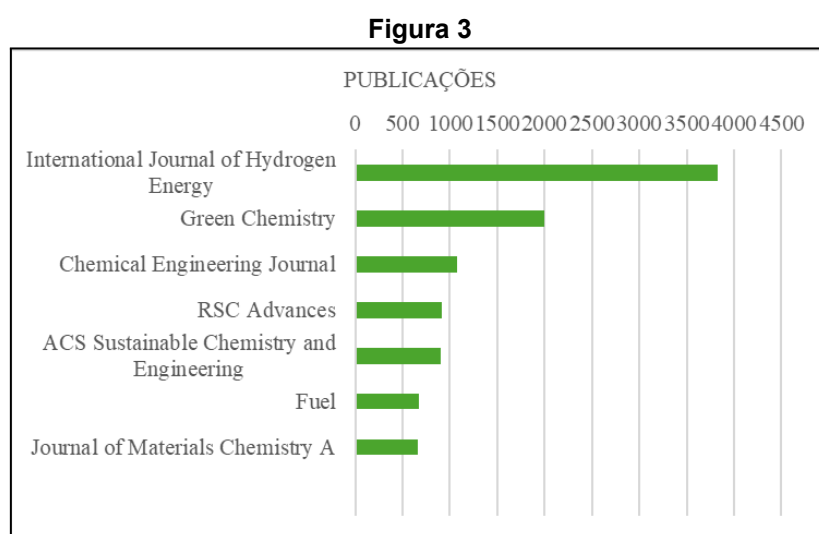


Fonte: Autoria própria (2024)

Figura 2: Número de publicações sobre o hidrogênio verde ao longo dos anos. Fonte: Autoria Própria (2024).

5.3 Principais periódicos

A figura 3 mostra como as publicações sobre hidrogênio verde foram distribuídas entre várias revistas científicas. Com 3.822 artigos, o International Journal of Hydrogen Energy se consolida como o principal fórum de pesquisa no campo. Em segundo lugar, a revista Green Chemistry tem 1.993 publicações, mostrando a preocupação com a sustentabilidade química.



Fonte: Autoria própria (2024)

Figura 3: Número de publicações dos periódicos sobre o hidrogênio verde. Fonte: Autoria Própria (2024).

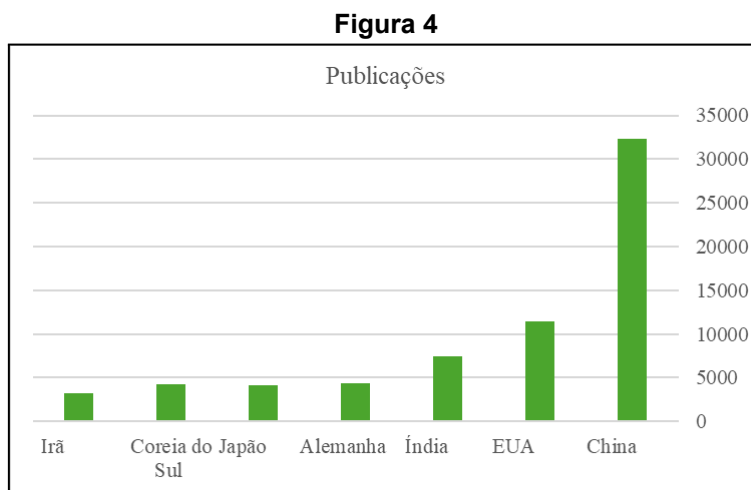
Essas informações mostram que vários periódicos foram envolvidos na pesquisa sobre hidrogênio verde, mostrando o quão importante é o trabalho interdisciplinar no assunto. As revistas importantes, que abrangem desde química e engenharia até ciência dos materiais, demonstram que o desenvolvimento de hidrogênio verde é fundamental para a sustentabilidade e os avanços tecnológicos na transição energética global.

5.4 Países que pesquisam sobre hidrogênio verde

A Figura 4 ilustra a distribuição das publicações sobre hidrogênio verde entre diferentes países. A China lidera com 32.321 publicações, destacando-se amplamente dos demais.

Os Estados Unidos aparecem em segundo lugar com 11.450 publicações, seguidos pela Índia com 7.410.

A diferença entre a China e os outros países é notável, indicando uma forte liderança chinesa na pesquisa sobre hidrogênio verde. O bloco formado por Alemanha, Japão e Coreia do Sul possui um número de publicações relativamente próximo (entre 4.081 e 4.400), refletindo um interesse significativo, mas em menor escala. O Irã, com 3.185 publicações, completa o grupo.



Fonte: Autoria própria (2024)

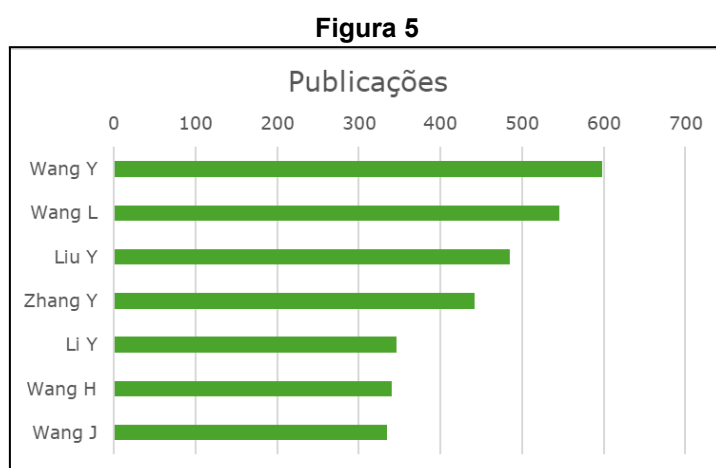
Figura 4: Números de publicações feitas pelos países que publicam sobre o hidrogênio verde. Fonte: Autoria Própria (2024).

Esses dados evidenciam o papel central da China, seguida por grandes economias como EUA e Índia, no avanço das pesquisas sobre hidrogênio verde, fundamental para a transição energética global.

5.5 Autores mais influentes no tema

A Figura 5 mostra os autores mais influentes no tema de hidrogênio verde, medido pelo número de publicações. Wang Y lidera com 598 publicações, seguido por Wang L com 546. Em terceiro lugar está Liu Y, com 485 publicações. Os números mostram uma clara liderança de alguns poucos autores, o que sugere que esses indivíduos têm grande impacto na área de pesquisa sobre hidrogênio verde.

A diferença entre o autor mais produtivo e os demais talvez esteja indicando a existência de redes de colaboração de pesquisa, ou ainda talvez a liderança do primeiro autor em outros projetos.



Fonte: Autoria própria (2024)

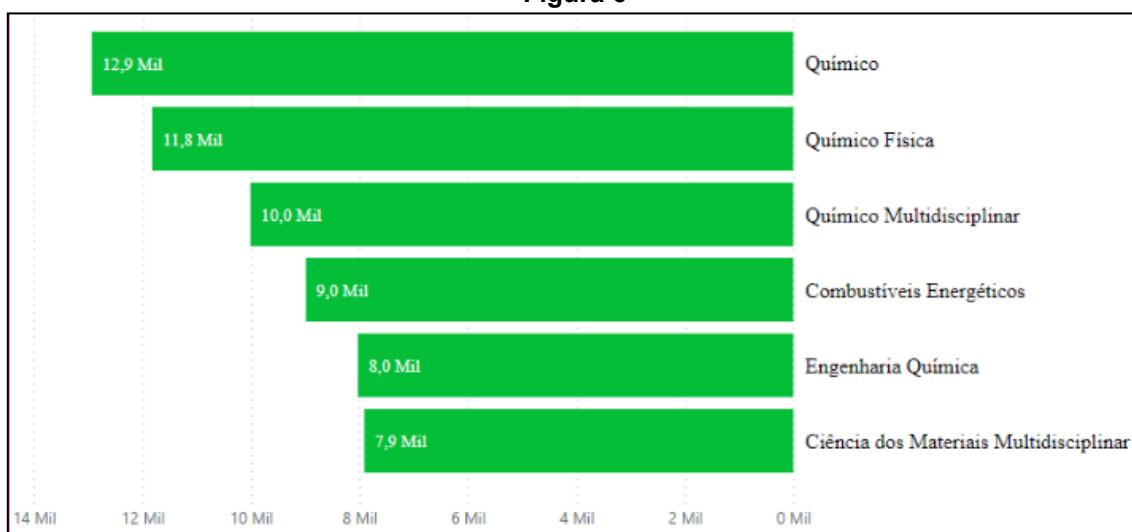
Figura 5: Números de publicações feitas por autores que publicam sobre o hidrogênio verde. Fonte: Autoria Própria (2024).

5.6 Setores que estudam as aplicações do Hidrogênio Verde

A figura 6, mostra como as publicações sobre hidrogênio verde foram distribuídas entre vários setores de pesquisa. Com 12.936 publicações, o campo químico lidera, seguido por químico-física (11.821) e química interdisciplinar (10.006), mostrando a importância da química no estudo desse campo. Combustíveis Energéticos (8.987), Engenharia Química (8.026) e Ciência dos Materiais Multidisciplinares (7.908) também têm uma presença significativa, refletindo o foco na energia, engenharia e novos materiais para o uso do hidrogênio.

Esses dados mostram que a pesquisa sobre hidrogênio verde envolve muitos campos diferentes, com química sendo o foco principal, mas também muitas outras áreas relacionadas à energia e materiais, que são importantes para a transição energética.

Figura 6



Fonte: Autoria própria (2024)

Figura 6: Números de publicações feitas pelas áreas que publicam sobre o hidrogênio verde. Fonte: Autoria Própria (2024).

5.6 Discussões

Os resultados destacam uma variedade de abordagens adotadas na literatura, que variam desde o mapeamento de países e setores até a análise de redes de colaboração entre autores. Essas abordagens incluem a identificação dos países mais ativos na pesquisa sobre hidrogênio verde, delineando suas contribuições para a inovação tecnológica e a sustentabilidade ambiental (IRENA, 2020). Além disso, são explorados os setores industriais que estão na vanguarda do desenvolvimento e aplicação de tecnologias relacionadas ao hidrogênio verde, como o setor energético, industrial e de transporte (Bocken *et al.*, 2014).

A análise também revela as redes de colaboração entre autores e instituições, destacando a importância da cooperação internacional e interdisciplinar na promoção do avanço científico e tecnológico neste campo. Com base nos conceitos apresentados por Parra *et al.* (2019), a Figura 1 ilustra as principais tendências e dinâmicas da pesquisa sobre hidrogênio verde, enfatizando a relevância da participação de diferentes setores e entidades na promoção de soluções sustentáveis para os desafios energéticos globais.

6. Conclusão

A International Journal of Hydrogen Energy é o principal periódico de pesquisa sobre hidrogênio verde, enquanto o campo está se expandindo rapidamente. O avanço nesse campo foi impulsionado principalmente por países como a China, os Estados Unidos e a Índia, com a China sendo a principal contribuinte.

Os principais autores, como Wang Y e Wang L, têm feito um grande impacto na pesquisa, mostrando que há fortes redes de colaboração e uma liderança acadêmica forte. O vasto potencial do hidrogênio verde reflete os setores de pesquisa predominantes, como química e engenharia química.

O alto custo de produção e a necessidade de uma infraestrutura adequada são os principais problemas identificados. No entanto, para superar essas dificuldades, a cooperação interdisciplinar e global é essencial. A pesquisa crescente indica que o hidrogênio verde será um componente crítico no futuro da energia sustentável.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio recebido do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES), e da Unidade de Investigação em Governança, Competitividade e Políticas Públicas (GOVCOPP), Universidade de Aveiro, Portugal.

Referências

Livro

Bockris, J. O., Reddy, A. K. N., & Gamboa-Aldeco, M. (2002). *Modern Electrochemistry 2ed 2002 Vol 2a Fundamentals Of Electrodics*. KLUWER ACADEMIC PUBLISHERS.

Léon, A. (2008). *Hydrogen technology: Mobile and portable applications*. Springer Science & Business Media.

Periódico

IEA. (2019). *The Future of Hydrogen*. International Energy Agency.

IRENA. (2020). *Green Hydrogen: A Guide to Policy Making*. International Renewable Energy Agency.

Artigo de Periódico

Acar, C., & Dincer, I. (2020). The potential role of hydrogen as a sustainable transportation fuel to combat global warming. *International Journal of Hydrogen Energy*, 3396–3406.

Bocken, N., Short, S. W., Rana, P., & Evans, S. (2014). A literature and practice review to develop sustainable business model archetypes. *Journal of Cleaner Production*, 65:42–56.

Parra, D., Valverde, L., Poncelet, K., Di Somma, M., Vermooten, R., et al. (2019). Green hydrogen for decarbonizing the energy system: the basis of an emerging business case. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 101, 279-289.

Staffell, I., Scamman, D., Abad, A. V., Balcombe, P., Dodds, P. E., Ekins, P., Shah, N., & Ward, K. R. (2019). The role of hydrogen and fuel cells in the global energy system. *Energy & Environmental Science*.

Zhang, X., Zhang, Y., & Deng, Y. (2020). Recent progress in electrocatalysts for hydrogen production from electrochemical water splitting. *Energy Science & Engineering*, 8(5), 1547-1560.

Artigo de Jornal

da Energia, A. (2024). França descobre fonte de hidrogênio branco. *ALÉM DA ENERGIA*. <https://www.alemdaenergia.engie.com.br/franca-descobre-fonte-de-hidrogenio-branco/>

Internet

Azevedo, J. (s.d.). *Hidrogênio Cinza*. eCycle. Recuperado 17 de outubro de 2024, de <https://www.ecycle.com.br/hidrogenio-cinza/>

Fernández-Arias, P., Antón-Sancho, Á., Lampropoulos, G., & Vergara, D. (2024). Emerging Trends and Challenges in Pink Hydrogen Research. *DOI*. https://doi.org/PabloFernández-Arias1,*ORCID,ÁlvaroAntón-Sancho1ORCID,GeorgiosLampropoulos2ORCIDandDiegoVergara1,*ORCID

Howarth, R. W., & Jacobson, M. Z. (2021). How green is blue hydrogen? *DOI*. <https://doi.org/10.1002/ese3.956>

Liu, W., Wan, Y., Xiong, Y., & Gao, P. (2022). Green hydrogen standard in China: Standard and evaluation of low-carbon hydrogen, clean hydrogen, and renewable hydrogen. *DOI*. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.10.193>

Moreira, T. (s.d.-a). *Hidrogênio amarelo: o que é, vantagens e impactos*. eCycle. Recuperado 18 de outubro de 2024, de <https://www.ecycle.com.br/hidrogenio-amarelo/>

Moreira, T. (s.d.-b). *Hidrogênio musgo: o que é, vantagens e desafios*. eCycle. Recuperado 18 de outubro de 2024, de <https://www.ecycle.com.br/hidrogenio-musgo/>

Ogden, J. M. (1999). Prospects for building a hydrogen energy infrastructure. *ResearchGate*. https://www.researchgate.net/publication/228537942_Prospects_for_building_a_hydrogen_energy_infrastructure

Teso, A., Cloete, S., del Pozo, C. A., Abanades, A., & Zaabout, A. (2024). Integration assessment of turquoise hydrogen in the European energy sector. *DOI*. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2024.118334>