

## ECONOMIA DO HIDROGÊNIO VERDE E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL: AGENDA DE PESQUISA COM BASE EM BIBLIOMETRIA DE DADOS DA SCOPUS

MÁRCIA ZABDIELE MOREIRA  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ - UFC

CLAUDIO BEZERRA LEOPOLDINO

KÍLVIA SOUZA FERREIRA

FABIANA PINTO DE ALMEIDA BIZARRIA

### Introdução

O hidrogênio verde (H2V), oriunda de fontes renováveis, representa uma estratégia energética vasta, armazenável e descarbonizada (Erbach & Jensen, 2021, Elkerbout et al., 2020). Governos e empresas privadas investem recursos progressivamente para o desenvolvimento de tecnologias de hidrogênio, mas ainda há desafios técnicos, implicações econômicas e geopolíticas (Noussan et al., 2021; Saygin & Gielen, 2021; Wanner, 2021). O H2V, como uma alternativa, contribui com o desaquecimento global, proteção do meio ambiente e com os direitos fundamentais transindividual e intergeracional (Lenza, 2020).

### Problema de Pesquisa e Objetivo

Com o estudo pretende-se responder: Como a pesquisa sobre Economia do Hidrogênio Verde pode evoluir para o campo de Gestão? Nesse sentido, a pesquisa objetiva mapear a produção científica sobre Economia do Hidrogênio Verde indexada na base de dados Scopus, na perspectiva de contribuições na elaboração de agenda de pesquisa para o campo da Gestão, principalmente, nas áreas de Produção, Logística, Estratégia, Competitividade, considerando ampliação recente de discussões sobre o tema, relacionada às questões ambientais e desenvolvimento sustentável.

### Fundamentação Teórica

O hidrogênio verde (H2V) desempenha um papel potencialmente valioso na produção de energia no futuro (IEA, 2019; Saygin & Gielen, 2021). Nas últimas décadas, ampliaram-se estudos sobre a produção de hidrogênio de fontes diversas, transportando e armazenando-o, e usando-o para fornecer serviços de energia final sem emissões, com repercussão no âmbito político e empresarial sobre essa fonte de energia (IEA, 2019; Saygin & Gielen, 2021). As tecnologias para geração de hidrogênio estão classificadas a partir de um espectro de cores: cinza, azul, turquesa, verde, amarelo (ou roxo).

### Metodologia

A pesquisa de abordagem quantitativa utiliza método bibliométrico, considerando aspectos quantitativos da produção, disseminação e uso da informação registrada (Macias-Chapula, 1998). Para tanto, utiliza-se a sequência definida por Zupic e Cater (2015), no caso, análise de citação, análise de cocitação, acoplamento bibliográfico, análise de coautoria e de redes de palavras-chave. Para realização do levantamento das publicações analisadas no estudo, escolheu-se a base de dados Scopus, pertencente à empresa Elsevier

### Análise dos Resultados

Ainda pouco explorada na área de Economia e Gestão, a publicação científica sobre a economia do H2V apresentou crescimento intenso recentemente, em particular desde 2019. Embora em ampliação, percebe-se lacuna importante em pesquisas no âmbito da gestão dos processos e análises sobre o tema na perspectiva do desenvolvimento sustentável. Alguns países apresentaram maior produção científica, como a China, a Alemanha e os Estados Unidos. As publicações abordam tanto a produção como o armazenamento, o transporte e a utilização do H2V. Esboça-se uma cadeia produtiva complexa e descarbonizada.

### Conclusão

Como agenda de pesquisa são reconhecidos análises sobre: inovação sustentável; H2V e ecodesenvolvimento; H2V como alternativa energética em contexto de crise; dependência energética e gestão de fontes renováveis; cadeias de suprimento que utilizam o insumo; políticas públicas e gestão pública voltadas ao H2V; crise energética e investimentos em fontes renováveis; energia e mudanças climáticas; institucionalização e regulamentação da economia do H2V; competitividade entre os países na produção de H2V, estratégias competitivas, parcerias governo-empresa na produção de H2V.

### Referências Bibliográficas

Beswick, R. R., Oliveira, A. M., & Yan, Y. (2019). Does the green hydrogen economy have a water problem? *ACS Energy Letters*, 6(9), 3167-3169. Blank, D. M. P. (2015). O contexto das mudanças climáticas e as suas vítimas. *Mercator*, Fortaleza, 14 (2), 157-172, maio/ago. Dang, S. et al. (2020). Rationally designed indium oxide catalysts for CO<sub>2</sub> hydrogenation to methanol with high activity and selectivity. *Science advances*, 6(25). Erbach, G., & Jensen, L. (2021). EU Hydrogen Policy-Hydrogen as an Energy Carrier for a Climate-Neutral Economy. European Parliament Report.

### Palavras Chave

Hidrogênio verde, Economia, Sustentabilidade

# ECONOMIA DO HIDROGÊNIO VERDE E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL: AGENDA DE PESQUISA COM BASE EM BIBLIOMETRIA DE DADOS DA SCOPUS.

## 1 Introdução

Energia representa importante pilar da vida em sociedade, sendo a busca de fontes sustentáveis, essencial à vantagem competitiva para organizações e nações (Goldemberg & Lucon, 2007) e para o desenvolvimento sustentável (Romano, 2014), considerando mitigação de problemáticas ambientais importantes, como, por exemplo, aquecimento global, secas e enchentes (Blank, 2015). Com isso, a busca por fontes energéticas renováveis estão na agenda das políticas no âmbito mundial, referendada pelo Acordo de Paris, assinado pelo Brasil e outros países, com o compromisso de redução de emissões de carbono até 2050 (Onubr, 2021), sendo, também, tema recorrente nos campos acadêmicos e empresariais (Mascarenhas & Weersma, 2017).

O hidrogênio verde (H2V), oriunda de fontes renováveis, representa uma estratégia energética vasta, armazenável e descarbonizada (Erbach & Jensen, 2021, Elkerbout et al., 2020). A Europa, por exemplo, visa tornar-se neutra climaticamente até 2050, com a tecnologia de energia de hidrogênio suprimindo até 14% da demanda continental; hoje, este percentual não chega a 2% (Erbach & Jensen, 2021; Elkerbout et al., 2020). O departamento de energia dos Estados Unidos da América (EUA), no que lhe concerne, trabalha para reduzir o custo de produção do hidrogênio em 80% em uma década (Energy.Gov, 2021).

Governos e empresas privadas investem recursos progressivamente para o desenvolvimento de tecnologias de hidrogênio, mas ainda há desafios técnicos, implicações econômicas e geopolíticas (Noussan et al., 2021; Saygin & Gielen, 2021; Wanner, 2021). Com isso, o hidrogênio ainda tem sido extraído principalmente do carvão e do gás natural, fontes de origem fóssil, que ampliam o impacto sob as mudanças climáticas (Beswick, Oliveira & Yan, 2019; IEA, 2019). Segundo *International Energy Agency* (2019) menos de 0,7% da produção atual de hidrogênio é de fontes renováveis ou de combustível fóssil em plantas equipadas para a captura do carbono emitido.

Crises energéticas demandam investimentos em transição com fontes renováveis de energia, como demonstram Chien et al. (2021) Gondal, Masood e Khan (2018) e Xu et al. (2019), em análise sobre a crise energética do Paquistão, e Andrade Guerra et al. (2015), ao apontar que o cenário energético brasileiro reflete em desabastecimento no médio e longo prazos O H2V, como uma alternativa, contribui com o desaquecimento global, proteção do meio ambiente e, ainda, com os direitos fundamentais transindividual e intergeracional (Lenza, 2020). Com a ampliação do tema, investigações podem contribuir com análises sobre meio ambiente e vida digna como direitos expressos pela Constituição Federal de 1988, artigos 225 e 170, bem como oportunidades de negócios e geração de empregos, para impulsionar a economia por meio das possibilidades de desenvolvimento econômico-social agregado.

Considera-se, assim, que ampliar a oferta de energia renovável é fator contributivo ao desenvolvimento, com ganhos relacionados ao trabalho humano (Sachs, 2012). Nesse caminho, o H2V pode ser referenciado a partir do desenvolvimento sustentável, considerando contribuições sociais, ambientais e econômicas, dentre outras possibilidades de desenvolvimento, como, por exemplo, o político, o cultural e o territorial, (Sachs, 2009), advindas com a descarbonização, com base em recursos energéticos eficiente e sustentável (Koneczma, 2021).

A pesquisa objetiva mapear a produção científica sobre Economia do Hidrogênio Verde indexada na base de dados *Scopus*, na perspectiva de contribuições na elaboração de agenda de pesquisa para o campo da Gestão, principalmente, nas áreas de Produção, Logística, Estratégia, Competitividade, considerando ampliação recente de discussões sobre o tema, relacionada às questões ambientais em referência ao desenvolvimento sustentável.

Em relação ao Brasil, considerando seu potencial para recursos energéticos renováveis, como afirmam Andrade Guerra et al. (2015), Blois et al. (2017) e Esmap (2020), há possibilidades econômicas no que tange à segurança energética e à capacidade de descarbonização dos setores de difícil redução de emissões. O Brasil, ainda, pode direcionar parte da produção do H2V para o mercado externo, com vistas a atender a demanda de países nos quais a transição de fontes fósseis para renováveis não pode ser atendida somente por recursos nacionais.

Contribuições da pesquisa, portanto, vão ao encontro de elaborações sobre políticas, programas e projetos relacionados ao uso do H2V na perspectiva da transição energética, como sugerem Lee & Kim (2021), Perez, Brent & Hinkley (2021), ao passo que o mapeamento reúne informações sobre o tema a partir de um amplo escopo de análise, com informações sobre pesquisadores, temas e relações teórico-empíricas sobre economia do H2V, que permite *insights* sobre agenda de pesquisas e amplia repertório para enfrentamento de desafios associados.

## **2 Economia do hidrogênio verde**

O hidrogênio verde (H2V) desempenha um papel potencialmente valioso na produção de energia no futuro (IEA, 2019; Saygin & Gielen, 2021). Nas últimas décadas, ampliaram-se estudos sobre a produção de hidrogênio de fontes diversas, transportando e armazenando-o, e usando-o para fornecer serviços de energia final sem emissões, com repercussão no âmbito político e empresarial sobre essa fonte de energia (IEA, 2019; Saygin & Gielen, 2021).

As tecnologias para geração de hidrogênio estão classificadas a partir de um espectro de cores: cinza (podendo ser também marrom ou preto) produzido por combustível fóssil, que causa emissão de dióxido de carbono; azul, através da combinação do cinza com captura e armazenamento de carbono e evitar a emissão de gases do efeito estufa; turquesa, por meio da pirólise de um combustível fóssil em que o subproduto é carbono sólido; verde, quando produzidos por eletrolizadores fornecidos por eletricidade renovável ou por outras vias baseadas em bioenergia; amarelo (ou roxo), produzido por eletrolizadores alimentados por eletricidade de usinas nucleares (Newborough & Cooley, 2020).

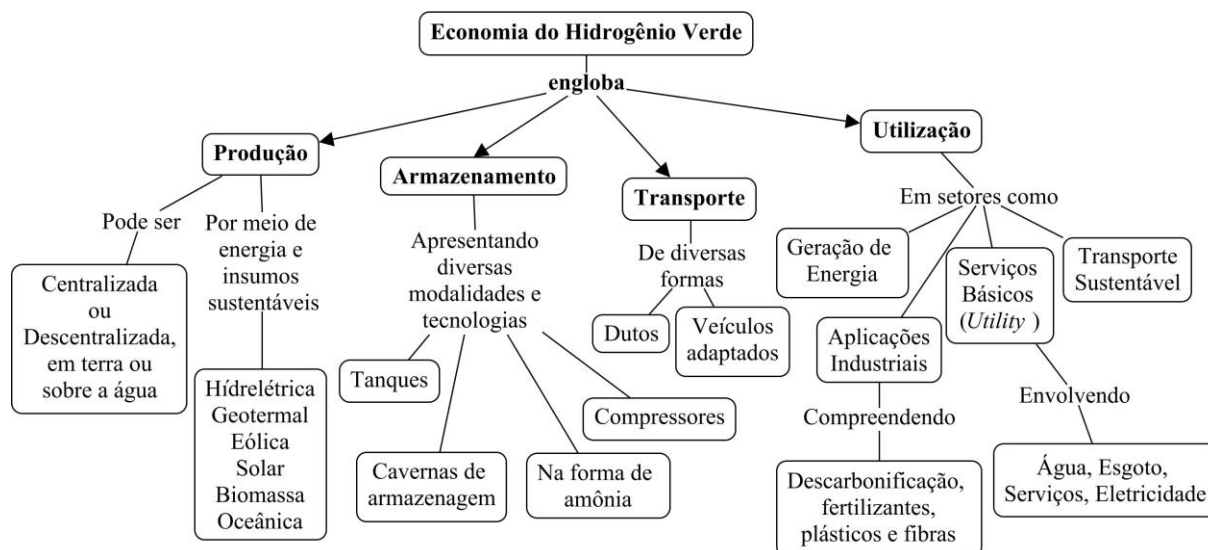
Em países que adotam a conversão de energia para gás combustível, *power-to-gas*, o hidrogênio tem sido considerado um material promissor, podendo ser utilizado imediatamente, armazenado indefinidamente para uso posterior ou transportado a longas distâncias (Gondal, 2018; Hinkley, 2021; Walker, Fowler & Ahmadi, 2015; Wanner, 2021). A escala de produção do H2V pode ser centralizada em grandes usinas ou ser feita em escala reduzida, de forma distribuída, para atender a demandas localizadas. Também pode ser implementada de forma *off shore*, sobre a água, utilizando energia verde, oriunda de fontes como a eólica ou solar. Tecnologias para aprimorar a eficiência da geração, como a hidrólise e consorciada com dessalinização da água, catalisadores e a produção através da biomassa têm sido abordadas em estudos (Beswick, Oliveira & Yan, 2019; Zhang, 2020).

A armazenagem de elevadas quantidades de H2V envolve desafios técnicos e tecnologias específicas, mas mitiga o problema da instabilidade da oferta de fontes eólicas e solares, e as limitações das baterias de lítio (Erbach & Jensen, 2021; Wanner, 2021). Pode ser feita em tanques projetados com esta finalidade, ou ainda em cavernas adaptadas para receber e armazenar o gás (Jastrzębski & Kula, 2021; Winkler-Goldstein & Rastetter, 2013).

O uso de compressores com alta eficiência permite a redução do volume e o melhor aproveitamento do espaço de armazenamento (Wanner, 2021). No caso da necessidade de transporte do H2V em grandes distâncias, ele é geralmente armazenado na forma de amônia ou hidrogênio líquido (Hinkley, 2021).

O hidrogênio produzido precisa de redes de distribuição eficientes para fazer com que a demanda seja atendida tempestivamente, ainda que distante do ponto de geração do insumo. Neste caso, o modal dutoviário apresenta-se como opção viável, podendo operar continuamente, se necessário (Wanner, 2021). O transporte via terrestre, marítima ou aérea pode ser feito por veículos adaptados com tanques de alta capacidade de armazenamento de hidrogênio líquido, ou amônia (Hinkley, 2021).

Aplicações possíveis do H2V são variadas. A geração de energia é promissora, em virtude do reduzido impacto ambiental e da possibilidade de armazenagem como hidrogênio ou metanol obtido de hidrogênio verde (Saygin & Gielen, 2021). No âmbito industrial, por exemplo, pode ser aplicado na descarbonização de processos, além da produção de fertilizantes, plásticos ou fibras utilizando. Espaços físicos e transportes (de pessoas e de cargas) também podem ser energizados de forma sustentável com essa fonte (Kotze et al., 2021; Perez, Brent & Hinkley, 2021). A figura 1 apresenta os desdobramentos setoriais da economia do hidrogênio verde.



**Figura 1.** Desdobramentos da Economia do Hidrogênio Verde.

Fonte: Adaptada de Beswick, Oliveira e Yan (2019), Zhang (2020), Perez, Brent e Hinkley (2021), Wanner (2021), Clark II e Rifkin (2006) e Noussan et al. (2021).

Considerando desdobramentos da Economia do H2V (Figura 1), observam-se desafios para integrar os diversos elos da economia do hidrogênio verde (Hinkley, 2021; Wanner, 2021). Para tanto, é relevante acionar envolvimento governamental e empresarial para financiar o desenvolvimento de tecnologias e os ganhos de escala (Perez, Brent & Hinkley, 2021), no sentido de contribuir com a gestão do processo de integração que permita agilidade no fluxo de produção, armazenagem, transporte e utilização do H2V.

O H2V, como fonte renovável, é sustentável (Sasanpour, Cao, Gils, & Jochem, 2021), posto que a produção de biohidrogênio a partir da fermentação escura de biomassa oferece um grande potencial para alcançar uma economia de H2V (He, Lei & Dai, 2021). Assim, com base na leitura de Sachs (2009), se reconhece que desafios do H2V devem problematizar a gestão do processo em relação às instituições, organizações e atores envolvidos, no âmbito da

incorporação de tecnologias necessárias ao desenvolvimento do potencial da energia renovável, com análise situada ao contexto de implementação, em respeito às dimensões do desenvolvimento que extrapolam o olhar apenas social, econômico e ambientalmente referidos.

Na perspectiva de Sachs (2009), ainda, o ecodesenvolvimento envolve novas fontes e tecnologias, mas é preciso que a ciência considere os atores envolvidos, sua história, sua territorialidade, sua dinâmica coletiva e política. Assim, as políticas, programas e projetos que visem ampliação de recursos poderão ter maior adesão, com ampliação do conceito e dos benefícios associados às comunidades e nações.

Dessa forma, o H2V e as inovações associadas contribuem para o desenvolvimento sustentável (Hansen, Grosse-Dunker & Reichwald, 2009), enquanto colabora com melhoria das condições de vida em sociedade, com reflexo em variadas dimensões do desenvolvimento (Sachs, 2009), em que a vantagem competitiva reflete em possibilidades adicionais do H2V para o desenvolvimento das economias de baixo carbono dos países (Pinsky et al., 2015; Froehlich, Mello & Engelman, 2017).

### **3 Método da pesquisa**

A pesquisa de abordagem quantitativa utiliza método bibliométrico, considerando aspectos quantitativos da produção, disseminação e uso da informação registrada (Macias-Chapula, 1998). Para tanto, utiliza-se a sequência definida por Zupic e Cater (2015), no caso, análise de citação, análise de cocitação, acoplamento bibliográfico, análise de coautoria e de redes de palavras-chave.

Para realização do levantamento das publicações analisadas no estudo, escolheu-se a base de dados Scopus, pertencente à empresa Elsevier, considerado ser a maior base de resumos e citações da literatura do mundo, com perfil interdisciplinar, integrando pesquisas nas áreas de ciência, tecnologia, saúde, ciências sociais, dentre outros (Elsevier, 2021). A plataforma Scopus, além de banco de dados, também oferece ferramentas para apresentação dos dados, facilitando a visualização de pesquisas.

Para o levantamento, em novembro de 2021, foram considerados os termos “*Green Hydrogen Economy*” no título, resumo e palavras-chave, resultando em 17 publicações. Ao se fazer novo levantamento com os termos “*Green hydrogen*” com o marcador booleano AND e o termo “*Economy*”, localizaram-se 105 documentos. Ao se aplicar filtro nos tipos de documentos foram mantidos apenas os artigos e os artigos de revisão, entre 2006 a 2021, pois a primeira publicação sobre Economia do Hidrogênio Verde indexada na *Scopus* data de 2006, correspondendo a 15 anos de publicações sobre o tema. Com a leitura flutuante dos 105 documentos, foram mantidos como base para a pesquisa 82 artigos e artigos de revisão, após exclusão de artigos de conferências, os itens de notícias, os materiais editoriais, os conteúdos de acesso antecipado, as cartas e os resumos de reuniões.

Para tratamento dos dados utilizou-se o *software* VOSviewer, versão 1.6.17, ferramenta para construção e visualização de redes bibliométricas que permite importar dados da base Scopus, entre outras bases. O *software* identifica redes formadas por periódicos, autores e países, as quais são elaboradas a partir de citações, acoplamento bibliográfico, cocitações ou relações de coautoria (VOSviewer, 2021).

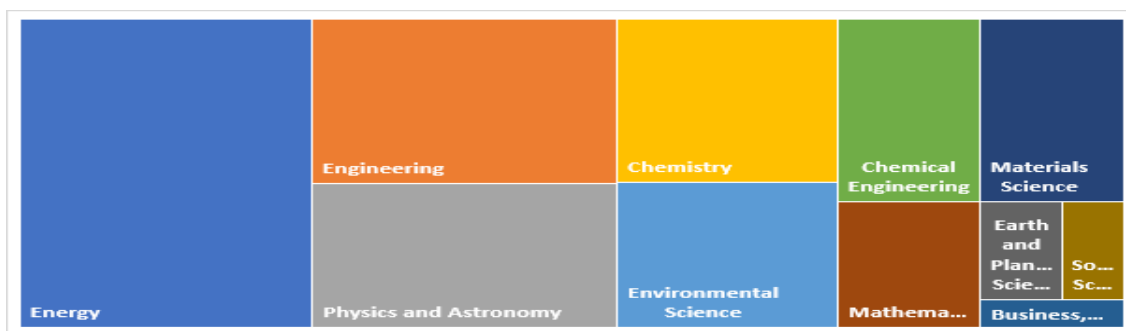
A análise de cocitação favorece a identificação das redes por meio da frequência com que os autores são referenciados conjuntamente. Desse modo, as citações e cocitações constituem uma das bases dos indicadores de ligação, representados graficamente por meio das redes sociais (Oliveira & Grácio, 2012). O acoplamento bibliográfico, no que lhe concerne, indica a lista de referências que tende se repetir nos artigos de determinada área, podendo ser realizado

a partir dos autores, documentos ou periódicos. A análise de coautoria, ainda, indica que autores costumam ser citados em conjunto nas publicações analisadas e a análise de palavras-chave conecta-as entre si e com termos utilizados no título e no resumo (Zupic & Cater, 2015).

#### 4 Bibliometria das publicações sobre “Green Hydrogen” and “Economy”

Os 82 artigos selecionados para o estudo estão distribuídas em 17 categorias definidas previamente pela plataforma *Scopus*: Energy (45), Engineering (25), Physics and Astronomy (22), Chemistry (18), Environmental Science (16), Chemical Engineering (13), Material Sciences (13), Mathematics (9), Earth and Planetary Sciences (4), Social Sciences (3), Business, Management and Accounting (2), Agricultural and Biological Sciences (1), Arts and Humanities (1), Biochemistry, Genetics and Molecular Biology (1), Computer Science (1), Medicine (1) e Multidisciplinary (1).

No Figura 1 apresentam-se as categorias com no mínimo 2 publicações representando as categorias. A categoria de Negócios, Gestão e Contabilidade contemplou apenas 2 publicações.

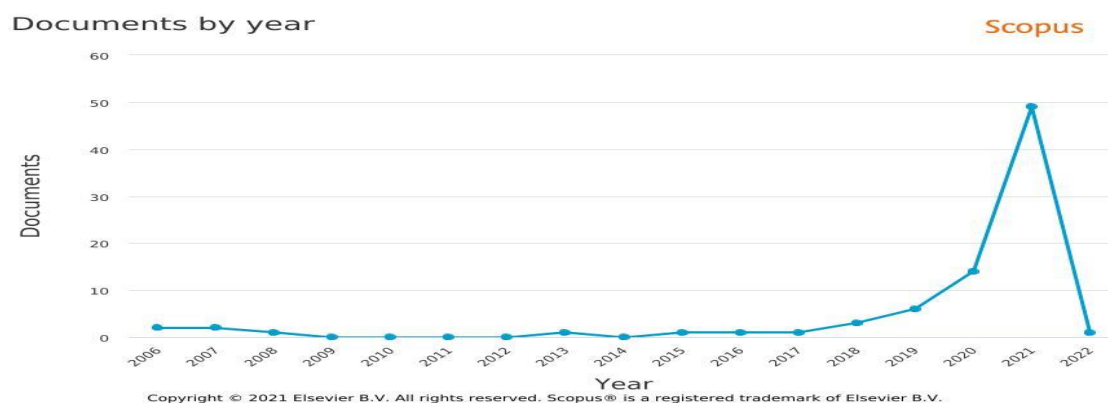


**Figura 1.** Principais categorias de publicação dos estudos sobre Economia do Hidrogênio Verde.

Fonte: Scopus (2021).

Pela Figura 1, pode-se observar que o tema em estudo abrange um escopo interdisciplinar, embora em maior amplitude para estudos relacionados a energia. Com a ilustração, ainda, percebe-se que a área de gestão possui pequena participação dos artigos selecionados, o que representar lacuna de estudos nessa área. Com base nos textos selecionados, os periódicos mais referenciados foram: *International Journal of Hydrogen Energy*, *Energies*, *Advanced Functional Materials*, *Chemical Engineering Journal*, *Energy*, *Energy Policy*, *Huagong Xuebao* *Ciesc Journal*, *Nanoscale* e *Sustainability (Switzerland)*.

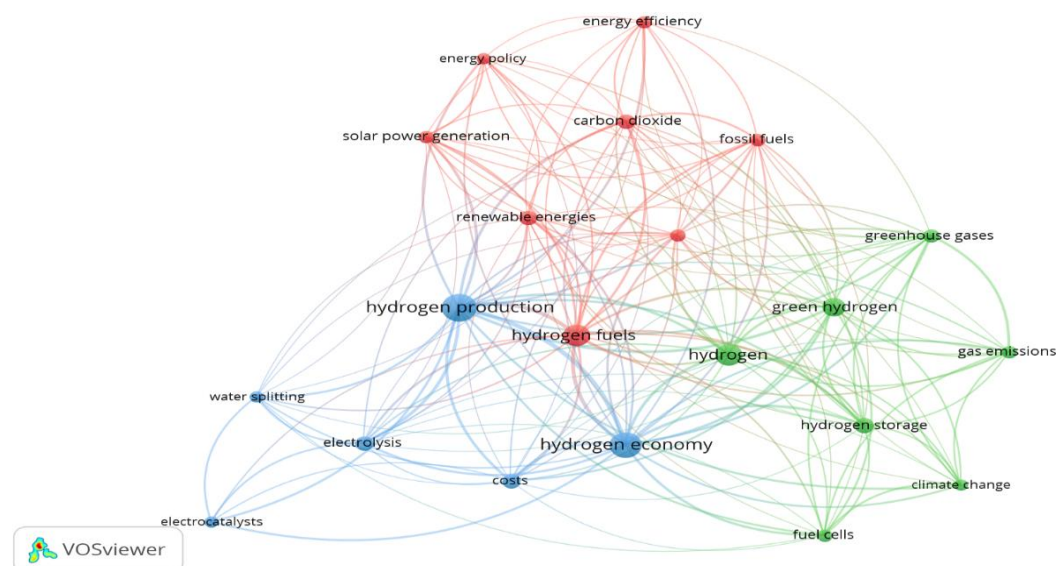
Quanto à evolução temporal das publicações, identificou-se que as publicações mais antigas sobre “Green Hydrogen” and “Economy” na base *Scopus* datam de 2006, com as publicações de Clark II e Rifkin (2006) e Parkinson (2006). Depois as publicações de Smith (2007), Clark (2007) e Clark II (2008). A evolução das publicações nesse período pode ser visualizada no gráfico 1.



**Gráfico 1.** Evolução das publicações e citações sobre Hidrogênio Verde de 2006 a 2021.  
Fonte: Scopus (2021).

Dos 82 artigos não há publicações entre 2009 e 2012 e em 2013, 2015, 2016 e 2017 há uma produção por ano, respectivamente as obras de Winkler-Goldstein e Rastetter (2013), Walker, Fowler e Ahmadi (2015), Moustafa et al. (2016) e Camacho et al. (2017). Em 2020 o volume de artigos aumenta, com crescimento expressivo em 2021, evidenciando ampliação de interesse dos pesquisadores sobre o tema.

Ao se conferir a co-ocorrência de palavras-chave nos 82 artigos, verificou-se um total de 940 palavras-chave, em que 21 delas apresentam o mínimo de 7 ocorrências, cuja força total do *link* foi 568 e 166 *links*. A figura 2 dispõe os *clusters* com a distribuição e conexão das palavras-chave.



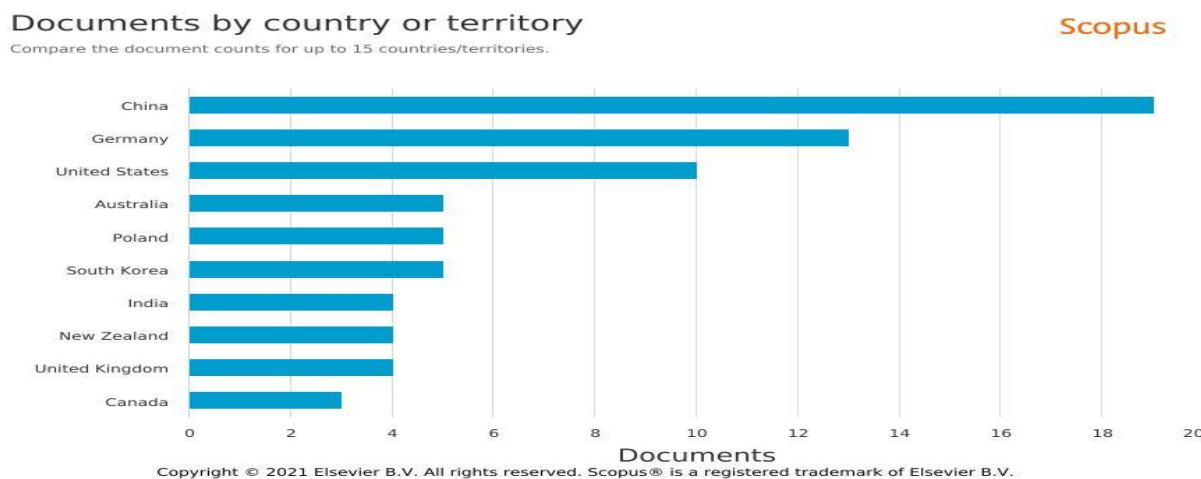
**Figura 2.** Output VOSviewer com a rede temática da co-ocorrência de palavras-chave.  
Fonte: Dados da pesquisa (2021).

O *cluster* azul compreende as palavras-chave: *carbon dioxide*, *energy efficiency*, *energy policy*, *fossil fuels*, *renewable energies*, *renewable energy resources* e *solar power generation*; o *cluster* verde é composto pelas palavras-chave: *climate change*, *fuel cells*, *gas emissions*, *green hydrogen*, *greenhouse gases*, *hydrogen*, *hydrogen storage*; e o *cluster* vermelho

contempla as palavras-chave: *costs*, *electrocatalysts*, *electrolysis*, *hydrogen economy*, *hydrogen production* e *water splitting*.

As palavras-chave estão caracterizadas em ordem decrescente em relação à força total do *link*, seguido do total de ocorrências na seguinte ordem: *hydrogen production* (156 total *link strength* e 41 ocorrências), *hydrogen economy* (134 *to* e 36), *hydrogen fuels* (107 e 25), *green hydrogen* (67 e 18), *hydrogen* (64 e 24), *greenhouse gases* (50 e 10), *electrolysis* (47 e 12), *carbon dioxide* (44 e 12), *costs* (42 e 11), *fossil fuel* (41 e 8), *fuel cells* (41 e 9), *gas emissions* (39 e 8), *climate change* (38 e 7), *renewable energy resources* (37 e 8), *solar power generation* (37 e 8), *renewable energies* (35 *to* e 11 *s*), *energy policy* (28 e 7), *water splitting* (28 e 7 *os*), *energy efficiency* (25 e 8) e *electrocatalysts* (24 e 7).

Os 82 artigos foram publicados por pesquisadores de 40 países diferentes. O Gráfico 2 apresenta o *ranking* dos 10 países com maior quantidade de publicações. Os países que apresentaram maior quantidade de publicações foram China (19 publicações), Alemanha (13) e os Estados Unidos (10).



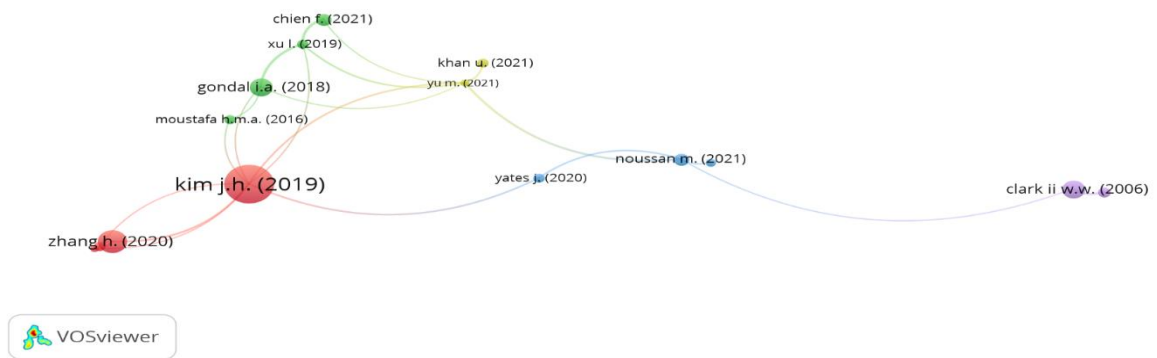
**Gráfico 2.** Publicações sobre “*Green Hydrogen*” and “*Economy*” por país.

Fonte: Scopus (2021).

Conforme gráfico 2, observa-se que os países com maior volume de pesquisa entre os textos do estudo são asiáticos, europeus e da América do Norte. A América do Sul, América Central e África foram inexpressivos em produção acadêmica sobre o tema.

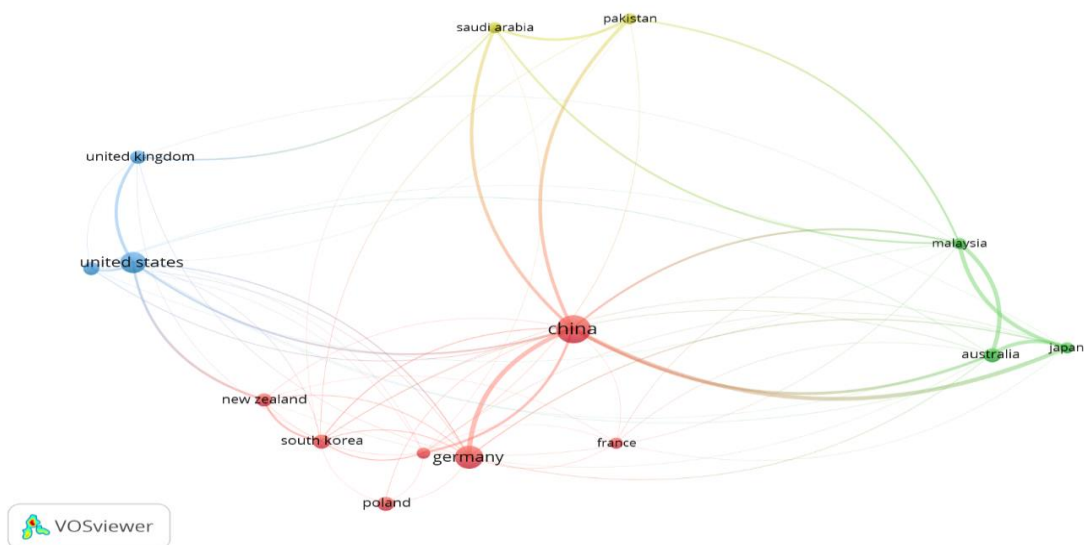
A rede de acoplamento bibliográfico por artigo está demonstrada na figura 3. Com no mínimo 9 citações por artigo identificou-se o total de 23 obras com força total de *link* igual a 42, distribuídos em 5 *clusters* e 23 *links*. O *cluster* 1 (vermelho) é composto pelos autores: Kim (2019), Lindquist (2020), Yang (2021) e Zhang (2020); o *cluster* 2 (verde) demonstra a relação entre os autores: Chien (2021), Gondal, Masood & Khan (2018), Moustafa (2016) e Xu (2019); o *cluster* 3 (azul) dispõe a relação entre os autores: Kazi (2021), Noussan (2020) e Yates (2020); o *cluster* 4 (amarelo) destaca a relação entre Khan (2021) e Yu (2021) e o *cluster* 5 (lilás) apresenta a relação entre Clark II (2006) e Clark II (2008).





**Figura 3.** Output VOSviewer com Rede de acoplamento bibliográfico por artigo  
 Fonte: Dados da pesquisa (2021).

Em relação à cocitação por país contatou-se o total de 40 países em que 15 deles tiveram o mínimo de 3 artigos publicados sendo citados pelo menos uma vez. A rede de cocitação por país apresenta força total de *link* de 2533, em que os 15 países estão distribuídos em 4 *clusters* e possui 63 *links*, conforme Figura 4.



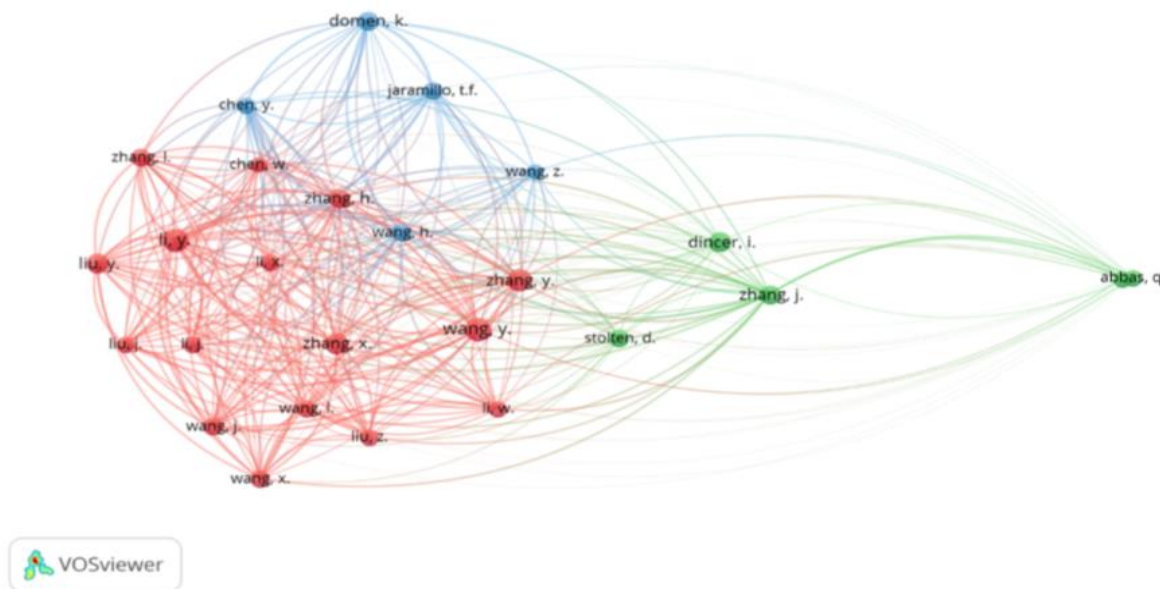
**Figura 4.** Output VOSviewer com a rede de cocitação por país  
 Fonte: Dados da pesquisa (2021).

Pela Figura 4, o *cluster* vermelho é composto pelos países: Canadá, China, França, Alemanha, Polônia e Coreia do Su; o *cluster* verde é representado pelos países: Austrália, Japão e Malásia; o *cluster* azul estão os países: Índia, Reino Unido e os Estados Unidos; e, por fim, no *cluster* amarelo estão o Paquistão e Arábia Saudita.

A ordem decrescente da força total do *link* por país tem as seguintes características: China (1178 *total link strength*, 227 ocorrências e 19 publicações), Japão (719, 18 e 3), Malásia (612, 8 e 3), Austrália (583, 32 e 5), Alemanha (355, 126 e 13), Arábia Saudita (354, 28 e 3),

Paquistão (324, 83 e 3), Estados Unidos (310 t, 124 e 10), Reino Unido (164, 2, 4), Nova Zelândia (153, 1, 4), Canadá (123, 32, 3), Coreia do Sul (114, 253, 5), Índia (60, 33, 4), França (10, 31, 3) e Polônia (7, 2, 5).

Em relação à cocitação por autores verificou-se o total de 10036 autores, em que 26 deles foram citados pelos menos 25 vezes, os quais foram distribuídos em 3 *clusters*. A força total de *link* obtida foi de 25778, com 310 *links*. A Figura 5 apresenta a rede de cocitação por autores.



**Figura 5.** Output VOSviewer com rede de cocitação por autores.

Fonte: Dados da pesquisa (2021).

O *cluster* vermelho é composto pela relação de cocitação entre os autores: Chen, W.; Li, J.; Li, W.; Li, X.; Li, Y.; Liu, J.; Liu, Y.; Wang, J.; Wang, L.; Wang, X.; Zhang, H.; Zhang, L.; Zhang, X.; e Zhang, Y. O *cluster* verde é composto pela rede de cocitação entre os autores: Abbas, Q.; Dincer, I.; Mohsin, M.; Stolten, D.; e Zhang, J. Por fim, o *cluster* azul, apresenta a rede de cocitação entre os autores: Chen, Y.; Domen, K.; Jaramillo, T.F.; Wang, H.; e Wang, Z. Agregando-se informações das publicações por país e das redes de cocitação entre autores, pode-se afirmar haver uma liderança chinesa nas pesquisas relativas à economia do hidrogênio verde.

A tabela 1 destaca o classificação das publicações mais citadas na base *Scopus*, em ordem decrescente, considerando os dados da pesquisa.

**Tabela 1.** Ranking dos artigos sobre Economia do Hidrogênio Verde mais citados.

Título do artigo	Autores	Ano	Periódico	Cit.
Toward practical solar hydrogen production-an artificial photosynthetic leaf-to-farm challenge	Kim, J. H. et al.	2019	Chemical Society Reviews	247
Bifunctional Heterostructured Transition Metal Phosphides for Efficient Electrochemical Water Splitting	Zhang, H. et al.	2020	Advanced Functional Materials	86
Green hydrogen production potential for developing a hydrogen economy in Pakistan	Gondal, I.A., Masood, S.A., Khan, R.	2018	International Journal of Hydrogen Energy	57
A green hydrogen economy	Clark II, W.W., Rifkin, J.	2006	Energy Policy	57
Rationally designed indium oxide catalysts for	Dang, S. et al.	2020	Science Advances	48

CO2 hydrogenation to methanol with high activity and selectivity				
Power to gas: The final breakthrough for the hydrogen economy?	Winkler-Goldstein, R., Rastetter, A.	2013	Green	31
The role of green and blue hydrogen in the energy transition-a technological and geopolitical perspective	Noussan, M., Raimondi, P.P., Scita, R., Hafner, M.	2021	Sustainability (Switzerland)	27
Dynamic planning, conversion, and management strategy of different renewable energy sources: A Sustainable Solution for Severe Energy Crises in Emerging Economies	Chien, F., Kamran, H.W., Albashar, G., Iqbal, W.	2021	International Journal of Hydrogen Energy	26
Comparative life cycle assessment of power-to-gas generation of hydrogen with a dynamic emissions factor for fuel cell vehicles	Walker, S.B., Fowler, M., Ahmadi, L.	2015	Journal of Energy Storage	18
The green hydrogen paradigm shift: Energy generation for stations to vehicles	Clark II, W.W.	2008	Utilities Policy	17
Evaluating renewable energy sources for implementing the hydrogen economy in Pakistan: a two-stage fuzzy MCDM approach	Xu, L., Shah, S.A.A., Zameer, H., Solangi, Y.A.	2019	Environmental Science and Pollution Research	15
Techno-economic analysis of green hydrogen production from biogas autothermal reforming	Camacho, Y.S. M. et al.	2017	Clean Technologies and Environmental Policy	15
Water Splitting for High-Yield Hydrogen Production Energized by Biomass Xylooligosaccharides Catalyzed by an Enzyme Cocktail	Moustafa, H.M.A. et al.	2016	Chem. Cat. Chem.	15
High capacity reversible hydrogen storage in titanium doped 2D carbon allotrope Ψ-graphene: Density Functional Theory investigations	Chakraborty, B., Ray, P., Garg, N., Banerjee, S.	2021	International Journal of Hydrogen Energy	14

Fonte: Adaptada de Scopus (2021).

Nota: Cit.: Total de citações

Com referência na tabela 1, Clark II e Rifkin (2006) é o primeiro artigo publicado entre os textos selecionados. No artigo, os autores apresentam evidências de que uma economia baseada no H2V em formação não demoraria a se concretizar. As tecnologias em desenvolvimento foram apresentadas como oportunidades para os setores públicos e privados, mesmo com os altos custos associados.

Clark II continua a aprofundar sua defesa de uma economia do H2V em novo estudo, publicado em 2008. Nesta obra, o autor apresenta essa economia como uma terceira revolução industrial, a ser fundamentada em três pilares: (i) geração descentralizada de energia; (ii) hidrogênio verde; e (iii) dispositivos de armazenamento avançados. A Califórnia e a União Europeia são apresentadas pelo autor como líderes nesta mudança, pelos investimentos feitos em energias de fontes renováveis. Os benefícios da economia de H2V apontados pelo autor englobam ganhos para a sustentabilidade, o desenvolvimento econômico e o aumento de empregos (Clark II, 2008).

A crise econômica de 2008 parece ter influenciado o movimento voltado à sustentabilidade (Geels, 2013), com possível reflexo nas produções relacionadas ao tema nos anos subsequentes. Noussan et al. (2021), por exemplo, tratam da economia de H2V no período pós-crise de 2008, com destaque para os avanços nas tecnologias que favorecem o crescimento do consumo e da produção de H2V, em uma transição para uma economia de zero emissão de carbono a se concretizar nas próximas décadas. Reforçam, ainda, oportunidades geopolíticas de comércio entre países produtores e consumidores, bem como projeções de redução de custos de produção, aumento de consumo dos países e ampliação de veículos movidos a hidrogênio.

Kim et al. (2019) abordam os desafios e variações da produção de H<sub>2</sub>V através da energia solar por meio dos processos fotocatalítico (*photocatalytic* - PC), fotoeletroquímico (*photoelectrochemical* - PEC) e eletrólise fotovoltáica (*photovoltaic-electrolysis* - PV-EC). A necessidade de ganho de escala é evidenciada pelos autores com a metáfora de “um desafio fotossintético artificial de uma folha para uma floresta”.

O trabalho de Zhang (2020) aborda a tecnologia de eletrocatalizadores voltados para a eletrólise de água, a qual demanda mais eficiência como custo-benefício. A pesquisa identificou desafios técnicos que teriam de ser superados ao longo de uma década, para que a tecnologia possa ser efetivada como opção para aplicações comerciais.

Dang et al. (2020) buscaram desenvolver melhores catalizadores para produzir metanol através de hidrogênio obtido de fontes sustentáveis, para captura de carbono. Os cientistas apresentaram testes comparativos de diversos catalisadores, relativos à sua performance temporal, em ambiente experimental.

Gondal, Masood e Khan (2018) retratam o Paquistão como um país em crise energética, com dificuldade de manter o suprimento de energia e conter o crescimento de sua demanda. Nesse cenário, o H<sub>2</sub>V caracteriza-se como alternativa para aproveitar o potencial de geração do país. O texto ressalta a capacidade de gerar energia por fontes renováveis disponíveis, denotando que a geração de energia renovável baseada no hidrogênio de biomassa e o de energia solar seriam as alternativas mais promissoras para desenvolver a economia do hidrogênio verde no país.

Xu et al. (2019) também analisaram as potencialidades de geração de energias renováveis do Paquistão. Utilizando uma conjunção de métodos quantitativos, envolvendo análise multicritério e análise envoltória de dados, os autores verificaram que as fontes mais eficientes para a produção de H<sub>2</sub>V no país são a energia eólica e a solar. Segundo os autores, resíduos sólidos urbanos (RSU) e biomassa também podem ser considerados alternativamente como matérias-primas para a geração econômica de hidrogênio. A geração de hidrogênio por meio da energia geotérmica foi considerada a menos eficiente, portanto, não recomendada. Os resultados de Xu et al. (2019) diferem dos que foram apresentados por Gondal, Masood e Khan (2018), posto que autores consideraram mais viáveis as fontes de energia mais abundantes, enquanto Xu et al. (2019) utilizassem um conjunto mais amplo de critérios, para selecionar as fontes de energia para a geração do hidrogênio verde.

A pesquisa de Chien et al. (2021) complementa a de Gondal, Masood e Khan (2018) e a de Xu et al. (2019), por abordar a crise energética do Paquistão e as formas alternativas de geração do H<sub>2</sub>V, como potencial solução para esta questão. Os autores advogam enfaticamente pela produção de H<sub>2</sub>V através de energia eólica, uma das potencialidades do país, utilizando um modelo quantitativo. Como fontes alternativas, os autores apontam pequenas hidrelétricas e energia solar. Há, portanto, discordância em relação aos achados de Gondal, Masood e Khan (2018) e de Xu et al. (2019), sobre a geração de energia de hidrogênio verde no Paquistão, controvérsia que deve estar ocorrendo em vários países.

Winkler-Goldstein e Rastetter (2013) apresentam em detalhes a estratégia “*Power to Gas*”, utilizada na Alemanha para armazenar hidrogênio e conciliar demanda e oferta. A utilização de 40 cavernas adaptadas para a armazenagem de bilhões de metros cúbicos de gás permite que, em momentos de baixa procura, elevadas quantidades de hidrogênio sejam armazenadas, podendo a qualquer momento, com aumento de consumo, serem recuperadas e disponibilizadas tempestivamente. No caso da Alemanha, pode ser estocada energia nos meses mais quentes para uso nos meses de inverno, por exemplo. Esta forma inovadora de armazenagem estimula tanto o ganho de escala de produção como a sua estabilidade, reduzindo ajustes em virtudes de picos e quedas de demanda.

A armazenagem de hidrogênio também é estudada no trabalho de Brahamananda et al. (2021). Neste caso, a pesquisa avalia as características de material inovador utilizado em tanques de armazenagem, com resultados positivos em critérios como reciclagem e capacidade.

A pesquisa de Camacho et al. (2017) avalia a viabilidade financeira da produção de H<sub>2</sub>V a partir de biogás (“*biogas-to-hydrogen*”). Os custos e amortizações ao longo de 10 anos mostram que seria possível produzir hidrogênio com um custo bem menor que o valor alvo definido pela comunidade europeia, de 5 €/kg de H<sub>2</sub>.

A produção de hidrogênio por biomassa foi objeto da pesquisa de Moustafa e outros (2016). Os autores apresentaram um experimento de laboratório que utilizou enzimas como catalizadores para a geração de hidrogênio, realizado com sucesso. Pesquisas sobre catalizadores apresentam potencial para acelerar as reações de produção de hidrogênio, assim como reduzir custos e a necessidade de energia.

O trabalho de Walker, Fowler e Ahmadi (2015) destaca-se por avaliar a efetividade da redução da emissão de carbono através da adoção de veículos abastecidos com H<sub>2</sub>V. A análise comparativa com veículos de combustão interna mostrou que a tecnologia de veículos movidos a H<sub>2</sub>V é bem mais efetiva em redução de emissões de carbono ao longo do ciclo de vida do veículo.

Os artigos mais citados na Scopus, portanto, demonstram uma economia do H<sub>2</sub>V em processo de estruturação, que ganhou dinamismo após a recuperação da crise econômica de 2008. Os artigos mostram a construção de uma visão abrangente da cadeia de produção, armazenagem, distribuição e aplicações, associadas ao hidrogênio verde (Clark II & Rifkin, 2006; Clark II, 2008; Noussan et al., 2021), em sua complexidade. A necessidade de aprimorar os processos de produção do H<sub>2</sub>V aparece nos trabalhos de Kim et al. (2019), Zhang (2020) e Dang et al. (2020), trabalhos técnicos que avaliam melhorias que agreguem eficiência aos processos existentes. Tecnologias específicas para a geração de hidrogênio também ganharam destaque nos trabalhos de Camacho et al. (2017), e Moustafa et al. (2016), que abordaram a geração de hidrogênio com base em biogás e biomassa, atestando sua viabilidade.

A dificuldade em planejar e integrar a cadeia de produção aparece nos trabalhos voltados a buscar alternativas para a geração de energia verde com base no hidrogênio no Paquistão (Chien et al., 2021; Gondal, Masood & Khan, 2018; Xu et al., 2019), visto que os estudos apresentam conclusões díspares entre si.

A armazenagem do hidrogênio produzido é discutida nos trabalhos de Winkler-Goldstein e Rastetter (2013) e Brahamananda et al. (2021), que abordam tecnologias distintas, suas características e critérios de avaliação. A pesquisa de Walker, Fowler e Ahmadi (2015), nesse caminho, analisa a efetividade da aplicação do H<sub>2</sub>V para a redução das emissões de carbono através da adoção de veículos abastecidos com este material.

As projeções de Clark II e Rifkin (2006) e Clark II (2008) mostraram-se otimistas, mas é inegável o avanço mostrado pela publicação científica nesta área. Esboça-se uma economia baseada no H<sub>2</sub>V, obtido de múltiplas fontes, com geração distribuída, descarbonizando diversas áreas de aplicação e abrindo novos mercados para novas tecnologias. Os desafios persistem, e não são pequenos: ganho de escala, redução de custos, melhoria de eficiência na geração, o desenvolvimento de tecnologias de armazenagem de energia, o planejamento e integração de cadeias de produção e distribuição do hidrogênio e o desenvolvimento do mercado de consumo desta energia, e aplicações com subsídios e segurança jurídica e física.

No que tange ao desenvolvimento sustentável, observa-se possibilidade de discussão a partir da perspectiva de crise energética, em referência a dependência energética na vida moderna e desafios para mobilização da economia de baixo carbono (Pinsky et al., 2015; Froehlich,

Mello & Engelman, 2017). Os estudos evidenciam esforços de compreensão sobre o hidrogênio verde e suas potencialidades como alternativa energética, incipientes análises voltadas à gestão de processos que tenham como referência ampliação do seu uso.

Assim, na perceptiva do ecodesenvolvimento (Sachs, 2009) e, no âmbito brasileiro, considerações sobre a CF de 1988, destaca-se importante agenda de pesquisa sobre a economia do hidrogênio verde: análise do hidrogênio verde como uma inovação sustentável (Hansen, Grosse-Dunker & Reichwald, 2009), o que compreende ampliar acesso à fonte energética com regulamentações que permitam políticas, programas e projetos que garantam benefícios à sociedade.

## **5 Considerações finais**

Ainda pouco explorada na área de Economia e Gestão, a publicação científica sobre a economia do H2V apresentou crescimento intenso recentemente, em particular desde o ano de 2019. Embora em ampliação, percebe-se lacuna importante em pesquisas no âmbito da gestão dos processos e, ainda, análises sobre o tema na perspectiva do desenvolvimento sustentável.

Alguns países apresentaram maior produção científica, como a China, a Alemanha e os Estados Unidos. Os chineses construíram uma rede de elaboração e cocitação de trabalhos, evidenciada pela bibliometria. As pesquisas sul-americanas e africanas são incipientes, assim como é baixa a participação de pesquisadores destes continentes nos artigos mais citados, podendo indicar desvantagens na disputa pela tecnologia do H2V.

As publicações abordam tanto a produção como o armazenamento, o transporte e a utilização do H2V. Esboça-se uma cadeia produtiva complexa e descarbonizada, ainda em estruturação, de alcance mundial, com potencial para proporcionar benefícios à sociedade. O potencial de geração descentralizada de energia e a existência de múltiplas fontes sustentáveis são estímulos aos governos e a grandes grupos empresariais para investimentos em projetos e pesquisa de tecnologias, gerando expectativa de crescimento na economia baseada no H2V.

As limitações do estudo consistiram, principalmente, na quantidade reduzida de publicações indexadas na *Scopus* com o termo “*Green Hydrogen Economy*”, em que foram localizados apenas 17 publicações. Enquanto com os termos buscados separadamente, ou seja, “*Green Hidrogen*” and “*Economy*”, ampliou o número de pesquisas, mas o número de 82 textos ainda representa baixo número de trabalhos para uma análise bibliométrica. Para superar essa limitação, recomenda-se que pesquisas futuras possam ampliar a busca em outras bases de dados, de maneira a ampliar o escopo do levantamento dos dados.

Como agenda de pesquisa são reconhecidos análises sobre: inovação sustentável; H2V e ecodesenvolvimento; H2V como alternativa energética em contexto de crise; dependência energética e gestão de fontes renováveis; cadeias de suprimento que utilizam o insumo, identificando seus participantes e avaliando sua eficiência; políticas públicas e gestão pública voltadas ao H2V; crise energética e investimentos em fontes renováveis; energia e mudanças climáticas; institucionalização e regulamentação da economia do H2V; competitividade entre os países na produção de H2V, estratégias competitivas, parcerias governo-empresa na produção de H2V.

Ressalta-se que a economia do H2V se consolidará apenas quando as aplicações deste insumo ganharem escala, permitindo a sua commoditização, bem como quando o tema abranger debates sobre gestão na perspectiva do desenvolvimento sustentável.

## **Referências**

- Andrade Guerra, J. B. S. O., Dutra, L., Schwinden, N. B. C. & Andrade, S. F. (2015). Future scenarios and trends in energy generation in Brazil: supply and demand and mitigation forecasts. *Journal of Cleaner Production*, 103, 197-210.
- Beswick, R. R., Oliveira, A. M., & Yan, Y. (2019). Does the green hydrogen economy have a water problem? *ACS Energy Letters*, 6(9), 3167-3169.
- Blank, D. M. P. (2015). O contexto das mudanças climáticas e as suas vítimas. *Mercator*, Fortaleza, 14 (2), 157-172, maio/ago.
- Blois, H. D., Paris, E., Carvalho, M. P. & Nunes, B. B. (2017). Silvicultura: cenários prospectivos para geração de energia elétrica. *GeAS - Revista de Gestão Ambiental e Sustentabilidade*, 6 (1), 140-159.
- Brahmananda, C. et al. (2021). High capacity reversible hydrogen storage in titanium doped 2D carbon allotrope  $\Psi$ -graphene: Density Functional Theory investigations. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(5), 4154-4167.
- Camacho, Y. S. M. et al. (2017). Techno-economic analysis of green hydrogen production from biogas autothermal reforming. *Clean Technologies and Environmental Policy*. 19(5), 1437-1447.
- Chien, F. S. et al. (2021). Dynamic planning, conversion, and management strategy of different renewable energy sources: a sustainable solution for severe energy crises in emerging economies. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(11), 7745-7758.
- Clark II, W. W. (2008). The green hydrogen paradigm shift: Energy generation for stations to vehicles. *Utilities Policy*, 16(2), 117-129.
- Clark II, W. W., & Rifkin, J. (2006). A green hydrogen economy. *Energy Policy*, 34(17), 2630-2639.
- Dang, S. et al. (2020). Rationally designed indium oxide catalysts for CO<sub>2</sub> hydrogenation to methanol with high activity and selectivity. *Science advances*, 6(25).
- Dincer, I. (2012). Green methods for hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 37(2), 1954-1971.
- Elkerbout, M. et al. (2020) The European Green Deal after Corona: Implications for EU climate policy. *CEPS Policy Insights*, 06, 1-12.
- Elsevier (2021). Banco de dados de resumos e citações organizados por especialistas. Disponível em <http://www.elsevier.com/pt-br/solutions/scopus>. Acesso em 07.11.2021.
- Energy.Gov. 2021, Disponível em <<https://www.hydrogen.energy.gov>> Acesso em nov. 2021.
- Erbach, G., & Jensen, L. (2021). EU Hydrogen Policy-Hydrogen as an Energy Carrier for a Climate-Neutral Economy. *European Parliament Report*.
- Esmap (2020), Energy Sector Management Assistance Program. Green Hydrogen in Developing Countries. Washington, DC: World Bank.
- Froehlich, C., Mello, D. & Engelman, R. (2017). Inovação e sustentabilidade: um olhar sobre a produção científica publicada em eventos da Associação Nacional de Pós-Graduação e Pesquisa em Administração. *Revista Gestão e Desenvolvimento*, Novo Hamburgo, 14 (2), 19-32, maio.
- Geels, F. W. (2013). The impact of the financial-economic crisis on sustainability transitions: Financial investment, governance and public discourse. *Environmental Innovation and Societal Transitions*, 6, 67-95.
- Goldemberg, J. & Lucon, O. (2007) Energia e meio ambiente no Brasil. *Estudos Avançados*, 21 (59), 7-20.
- Gondal, I. A. (2018). Hydrogen integration in power-to-gas networks. *International journal of hydrogen energy*, 44 (3), 1803-1815.

- Gondal, I. A., Masood, S. A., & Khan, R. (2018). Green hydrogen production potential for developing a hydrogen economy in Pakistan. *international journal of hydrogen energy* 43(12), 6011-6039.
- Hansen, E. G., Grosse-Dunker, F. & Reichwald, R. (2009). Sustainability innovation cube: a framework to evaluate sustainability-oriented innovations. *International Journal of Innovation Management*, 13 (4) 683-713.
- He, X., Lei, L., & Dai, Z. (2021). Green hydrogen enrichment with carbon membrane processes: Techno-economic feasibility and sensitivity analysis. *Separation and Purification Technology*. 2761.
- Hinkley, J. T. (2021). A New Zealand Perspective on Hydrogen as an Export Commodity: Timing of Market Development and an Energy Assessment of Hydrogen Carriers. *Energies*, 14(16).
- IEA - International Energy Agency. (2019) *The Future of Hydrogen - Seizing today's opportunities*. 203 p.
- Jastrzębski, K., & Kula, P. (2021) Emerging Technology for a Green, Sustainable Energy Promising Materials for Hydrogen Storage, from Nanotubes to Graphene-A Review. *Materials* 14.10, 2499.
- Kim, J. H. et al. (2019). Toward practical solar hydrogen production - an artificial photosynthetic leaf-to-farm challenge. *Chemical Society Reviews*, 48(7), 1908-1971.
- Koneczna, R., & Cader, J. (2021) Gospodarka Surowcami Mineralnymi – Mineral Resources Management, 53–74.
- Kotze, R. et al. (2021). Investigating the Investments Required to Transition New Zealand's Heavy-Duty Vehicles to Hydrogen. *Energies*, 14(6).
- Lee, D., & Kim, K. (2021). Research and development investment and collaboration Framework for the Hydrogen Economy in South Korea. *Sustainability*, 13(19).
- Lenza, P. (2021). Direito Constitucional Esquemático. São Paulo: Saraiva.
- Macias-Chapula, C. A. (1998). O papel da Infometria e da Cientometria e sua perspectiva nacional e internacional. *Ci. Inf.*, 27(2), 134-140, maio/ago.
- Mascarenhas, I. P. & Weersma, L. A. (2017). Fatores críticos de sucesso dos projetos de parques eólicos: estudo a partir dos stakeholders de uma empresa brasileira de grande porte. *Sodebras*, 143, 55-60.
- Moustafa, H. M. A., et al. (2016). Water Splitting for HighYield Hydrogen Production Energized by Biomass Xylooligosaccharides Catalyzed by an Enzyme Cocktail. *ChemCatChem* 8(18), 2898-2902.
- Newborough, M., & Cooley, G. (2020). Developments in the global hydrogen market: The spectrum of hydrogen colours. *Fuel Cells Bull.* 16–22.
- Noussan, M., Raimondi, P.P., Scita, R., & Hafner, M. (2021). The Role of Green and Blue Hydrogen in the Energy Transition: A Technological and Geopolitical Perspective. *Sustainability*, 13.
- Oliveira, E. F. T. & Grácio, M. C. (2012). Visibilidade dos pesquisadores no periódico Scientometrics a partir da perspectiva brasileira: um estudo de cocitação. *Em questão*. Porto Alegre, 18, Edição Especial, 99-113.
- Onubr. (2021) Nações Unidas No Brasil. *Acordo de Paris*. 2015. Disponível em: <https://nacoesunidas.org/wp-content/uploads/2016/04/Acordo-de-Paris.pdf>. Acesso em: 23 ago. 2021.
- Perez, R. J., Brent, A. C., & Hinkley, J. (2021). Assessment of the Potential for Green Hydrogen Fuelling of Very Heavy Vehicles in New Zealand. *Energies* 14(9), 2636.



- Pinsky, V. C., Moretti, S. L. A., Kruglianskas, I. & Plonski, G. A. (2015). Inovação sustentável: uma perspectiva comparada da literatura internacional e nacional. *RAI - Revista de Administração e Inovação*, 12(3), 226-250.
- Romano, G. (2014). Segurança energética e mudanças climáticas na União Europeia. *Contexto Int.*, Rio de Janeiro, 36(1), 113-143.
- Sachs, I. (2009). *Caminhos para o desenvolvimento sustentável*. Rio de Janeiro: Garamond.
- Sachs, I. (2012). De volta à mão visível: os desafios da Segunda Cúpula da Terra no Rio de Janeiro. *Estud. Av.*, São Paulo, 26(74) 5-20.
- Sasanpour, S., Cao, K.-K., Gils, H. C., & Jochem, P. (2021). Strategic policy targets and the contribution of hydrogen in a 100% renewable European power system. *Energy Reports*, 7, 4595-4608.
- Saygin, D., & Gielen, D. (2021). Zero-Emission Pathway for the Global Chemical and Petrochemical Sector. *Energies*, 14(13).
- VOSviewer. Welcome to VOSviewer. Disponível em <http://www.vosviewer.com>. Acesso em 07.11.2021.
- Walker, S. B.; Fowler, M., & Ahmadi, L. (2015). Comparative life cycle assessment of power-to-gas generation of hydrogen with a dynamic emissions factor for fuel cell vehicles. *Journal of Energy Storage* 4, 62-73.
- Wanner, M. (2021). Transformation of electrical energy into hydrogen and its storage. *The European Physical Journal Plus*. 136(5), 1-11.
- Winkler-Goldstein, R., & Rastetter, A. (2013) Power to gas: the final breakthrough for the hydrogen economy? *Green*, 3(1), 69-78.
- Xu, L. et al. (2019). Evaluating renewable energy sources for implementing the hydrogen economy in Pakistan: a two-stage fuzzy MCDM approach. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(32), 33202-33215.
- Zhang, H. J. (2020). Bifunctional Heterostructured Transition Metal Phosphides for Efficient Electrochemical Water Splitting. *Advanced Functional Materials*, 30(34).
- Zupic, I., & Cater, T. (2014). Bibliometric Methods in Management and Organization. *Organizational Research Methods*, 18(3), 429-472.