

A PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO VERDE NO CONTEXTO DA TRANSIÇÃO ENERGÉTICA GLOBAL E A CRISE DO CLIMA: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA

THE PRODUCTION OF GREEN HYDROGEN IN THE CONTEXT OF THE GLOBAL ENERGY TRANSITION AND THE CLIMATE CRISIS: A SYSTEMATIC REVIEW

JANAINA DOS SANTOS BENVINDO

FACULDADE DE ECONOMIA, ADMINISTRAÇÃO, ATUÁRIA E CONTABILIDADE DA UFC

CRISTIANO BARREIRA DA PONTE

FACULDADE DE ECONOMIA, ADMINISTRAÇÃO, ATUÁRIA E CONTABILIDADE DA UFC

MÁRCIA ZABDIELE MOREIRA

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ

Agradecimento à órgão de fomento:

FUNCAP

A PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO VERDE NO CONTEXTO DA TRANSIÇÃO ENERGÉTICA GLOBAL E A CRISE DO CLIMA: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA

Objetivo do estudo

Identificar o papel do hidrogênio verde na transição energética global e redução das mudanças climáticas.

Relevância/originalidade

Trata-se de um trabalho de revisão sistemática que une duas áreas muito em alta que são as questões da sustentabilidade e do hidrogênio verde no âmbito da transição energética global.

Metodologia/abordagem

Revisão Sistemática da Literatura (RSL), fundamentada na lista de verificação “Preferred Reporting Items for Systematic Reviews” - PRISMA

Principais resultados

Há uma indicação do crescimento do número de artigos publicados a partir de 2020, período coincidente com o ano que foi deflagrada a pandemia de covid-19, que aumentou a preocupação mundial com a sustentabilidade, mudanças climáticas, dependência de combustíveis fósseis entre outros.

Contribuições teóricas/metodológicas

We found gaps regarding how the transport of hydrogen in gas pipelines can be discussed with the population before being included in the public agenda and explore how green hydrogen contributes to generating technology and innovation environments.

Contribuições sociais/para a gestão

Aponta-se os principais temas discutidos no âmbito do hidrogênio verde e conseqüentemente são os temas que mais afetam as regiões, sobretudo as que se colocam como potenciais produtoras dessa nova energia.

Palavras-chave: Hidrogênio Verde, Transição energética, Energias renováveis

THE PRODUCTION OF GREEN HYDROGEN IN THE CONTEXT OF THE GLOBAL ENERGY TRANSITION AND THE CLIMATE CRISIS: A SYSTEMATIC REVIEW

Study purpose

Identify the role of green hydrogen in the global energy transition and mitigating climate change.

Relevance / originality

This is a systematic review work that unites two very popular areas, which are the issues of sustainability and green hydrogen in the context of the global energy transition.

Methodology / approach

Systematic Literature Review (SLR), based on the “Preferred Reporting Items for Systematic Reviews” checklist - PRISMA

Main results

There is an indication of the growth in the number of articles published from 2020, a period that coincides with the year in which the covid-19 pandemic broke out, which increased global concern about sustainability, climate change, dependence on fossil fuels, among

Theoretical / methodological contributions

We found gaps regarding how the transport of hydrogen in gas pipelines can be discussed with the population before being included in the public agenda and explore how green hydrogen contributes to generating technology and innovation environments.

Social / management contributions

The main topics discussed in the context of green hydrogen are pointed out and, consequently, they are the topics that most affect the regions, especially those that are potential producers of this new energy.

Keywords: Green Hydrogen., Energy transition, Renewable energy

A PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO VERDE NO CONTEXTO DA TRANSIÇÃO ENERGÉTICA GLOBAL E A CRISE DO CLIMA: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA

RESUMO

O fenômeno das mudanças climáticas é um problema enfrentado em âmbito mundial e requer ações integradas das entidades globais, a fim de combater seus efeitos devastadores e alcançar o desenvolvimento sustentável do planeta. Nesse contexto, é imperativa a transição energética, com a substituição de energias poluidoras por energias renováveis, e o hidrogênio verde desponta como um vetor energético que tem grandes possibilidades de atender essas demandas. Assim, o presente artigo tem como objetivo investigar o papel do hidrogênio verde na transição energética global e redução das mudanças climáticas. Para tanto, foi realizada uma revisão sistemática nas bases Web of science e Scopus e como fonte de base cinzenta o Google Acadêmico. Este estudo tem resultados relevantes de forma gráfica através do uso do software Vosviewer. Dessa forma, identificou-se que temas têm sido explorados pela comunidade acadêmica, agregados em 4 clusters em que o cluster azul trata de como a produção e aplicação do hidrogênio pode contribuir ou impactar na descarbonização do planeta. Já o cluster verde aponta para a economia do hidrogênio verde, por sua vez, o cluster vermelho está relacionado com a transição energética em si, discutindo a participação do hidrogênio nesse processo. Finalmente, o cluster amarelo reúne os temas que abordam as fontes energéticas renováveis, a partir das quais o hidrogênio verde é gerado.

Palavras-chave: Hidrogênio Verde. Transição energética. Energias renováveis.

ABSTRACT

The phenomenon of climate change is a problem faced worldwide and requires integrated actions by global entities in order to combat its devastating effects and achieve the sustainable development of the planet. In this context, the energy transition is imperative, with the replacement of polluting energies by renewable energies, and green hydrogen emerges as an energy vector that has great possibilities of meeting these demands. Thus, this article aims to investigate the role of green hydrogen in the global energy transition and mitigation of climate change. To this end, a systematic review was carried out in the Web of science and Scopus databases and Google Scholar as a gray base source. This study has relevant results graphically through the use of Vosviewer software. In this way, it was identified that themes that had been explored by the academic community, aggregated in 4 clusters in which the blue cluster deals with how the production and application of hydrogen can contribute or impact on the decarbonization of the planet. The green cluster points to the green hydrogen economy, in turn, the red cluster is related to the energy transition itself, discussing the participation of hydrogen in this process. Finally, the yellow cluster brings together topics that address renewable energy sources, from which green hydrogen is generated.

Keywords: Green Hydrogen. Energy transition. Renewable energy.

1 Introdução

A COP 27, realizada em 2022, o Acordo de Paris de 2015, bem como tantos outros pactos e instrumentos de mitigação dos efeitos das mudanças do clima alertam para as graves consequências do aquecimento do planeta. Nesse contexto, a transição energética, isto é, a

substituição gradativa de combustíveis fósseis por fontes renováveis de energia, é de extrema importância para o alcance dos objetivos estabelecidos nos acordos ambientais firmados (Ueckerdt *et al.*, 2021; Castro & Leal, 2022). Muito embora a transição energética também tenha uma perspectiva econômica, assim como outros processos de transição pelos quais a humanidade já passou, neste momento é mais relevante e urgente enfatizar a perspectiva ambiental e climática (Delgado *et al.*, 2022).

Para a implementação efetiva da transição energética, inúmeras dificuldades se apresentam no mundo todo, sobretudo no que concerne às tecnologias de produção, acondicionamento e logística dos materiais na produção de energia renovável, bem como as próprias fontes de matéria-prima (EPE, 2021). Nesse sentido, o hidrogênio verde (H2V) desponta como uma solução exequível na condução dos sistemas energéticos poluidores atuais para sistemas ambientalmente sustentáveis, ricos em energias renováveis (Dunn, 2002). Dessa forma, para a descarbonização da economia mundial acontecer, será imperativo o uso de vetores energéticos limpos, como o hidrogênio verde, em substituição às fontes de energia poluidoras nos mais diversos setores (Li *et al.*, 2017; Oliveira, 2022).

Cumprir destacar que os países altamente industrializados são os responsáveis pelo maior consumo de energia no mundo, considerando que quanto maior for o desenvolvimento econômico e social, maior será a demanda por energia (Finkler, 2016). Na lista dos 10 países que mais consomem energia, se encontram os maiores produtores de energia ou nações com economias altamente industrializadas (Butada, 2022). Dessa forma, os países desenvolvidos precisarão importar uma grande parte da demanda de hidrogênio, gerando oportunidades para diversas regiões (Pinkowski, 2020).

Diante do cenário de expansão do ramo de hidrogênio para utilização energética, há naturalmente uma expectativa de crescimento do hidrogênio no comércio internacional. Grandes atores mundiais começaram a se movimentar por meio de políticas de investimentos em plantas para a produção de hidrogênio para uso energético, como União Europeia e a Alemanha (EPE, 2021). Nesse sentido, estão sendo anunciadas iniciativas no mundo todo para a produção de hidrogênio verde em grande escala; 131 projetos nessa área foram anunciados, com conclusão até o ano de 2030, envolvendo investimentos de aproximadamente US\$ 500 bilhões, e mais de 30 países estão elaborando estratégias de hidrogênio verde. Além do que, espera-se que até o ano de 2025 os países que representam 80% do PIB mundial já estejam com seus planos nacionais de H2V plenamente definidos (CNI, 2022).

Nesse contexto de utilização do hidrogênio verde na transição energética e combate às mudanças climáticas, pergunta-se: Qual o papel do hidrogênio verde na transição energética global e na redução das mudanças climáticas? Dessa forma, o objetivo do presente artigo é identificar o papel do hidrogênio verde na transição energética global e redução das mudanças climáticas.

Portanto, o presente artigo busca contribuir com as pesquisas no que diz respeito a identificar se os estudos de hidrogênio verde estão sendo realizados dentro da perspectiva da transição energética e crise climática. Para tanto, foi realizado um mapeamento sistemático, por meio de uma abordagem quali-quantitativa nas bases Web of science e Scopus e como fonte de base cinzenta o Google Acadêmico.

2 Referencial Teórico

O problema das mudanças climáticas há muito tempo deixou de ser alerta científico e passou a ser uma um desafio mundial, cotidiano e com consequências calamitosas (Carvalho & Barbosa, 2019). A crise do clima é uma questão a nível global que deve ter uma agenda em

busca de maneiras para ser resolvida no curto, médio e longo prazo. Nesse sentido, os atores mundiais têm dialogado a respeito das soluções para essa questão, por meio de importantes acordos, culminando no atual Acordo de Paris (Moreira *et al.*, 2022).

De acordo com o estudo Net Zero Economy Index 2022 (PwC, 2022) a economia mundial tem uma taxa de descarbonização totalmente incompatível com o necessário para o atingimento das metas do Acordo de Paris, as quais almejam limitar o aquecimento global em entre 1,5°C. a 2°C. No entanto, as taxas de descarbonização mundial estão em torno de 1,4% (2021), a média global foi de 0,5% nos últimos 20 anos, o que se torna um número preocupante, muito aquém do necessário. Se for considerado que até o ano de 2030 essa taxa precisaria ser em torno de 15,2% por ano, percebe-se que o desafio é colossal, conforme demonstrado na Figura 1:

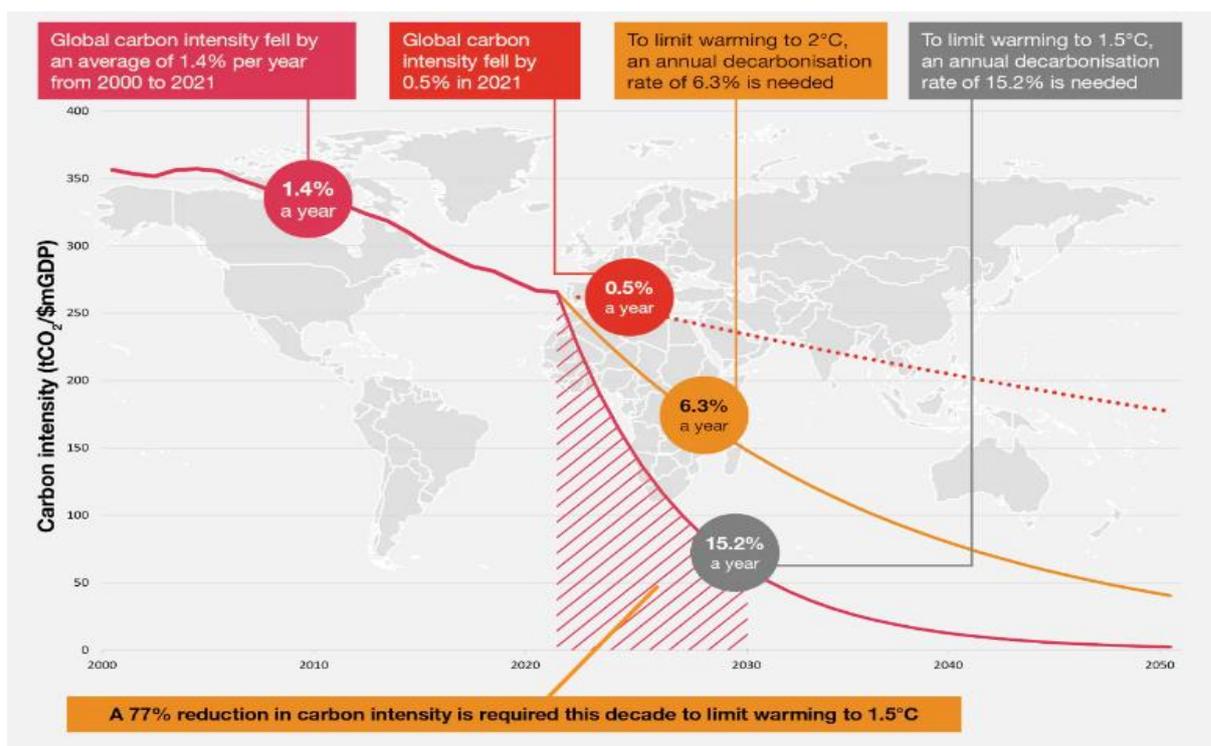


Figura 1. Dados do estudo Net Zero Economy Index 2022.

Fonte: PwC (2022).

Ainda com base na Figura 1, é possível inferir que até 2030 é necessária uma redução de carbono em 77%. No entanto, dado o histórico apresentado, entende-se que essas metas são muito difíceis de serem alcançadas, mostrando que há de fato um risco real de colapso ambiental.

As projeções de utilização das energias renováveis na matriz energética mundial da Agência Internacional de Energia Renovável são de que haverá um aumento considerável da participação desses recursos no setor de energia nos próximos anos, chegando a ter um acréscimo de 17% até 2030 e 25% até 2050. É previsto que tanto o carvão como o petróleo comecem a perder espaço na composição das fontes energéticas da matriz de energia global, de acordo com o avanço no uso de fontes limpas como as solar, eólica e os biocombustíveis.

No entanto, sabe-se que a principal dificuldade que se apresenta às nações é quanto às reservas de fontes renováveis, já que muitos países, especialmente na região da União Europeia, não dispõem desses recursos nem para suprir a demanda interna de energia deles,

tampouco para alcançar os objetivos de redução de utilização de combustíveis fósseis para a redução da poluição do planeta (Castro & Santos, 2021).

As desproporcionalidades do consumo de energia entre países desenvolvidos e em desenvolvimento são significativas. Enquanto um americano médio consome cerca do que equivalem às necessidades biológicas de 100 pessoas, todos os países da Organização para a Cooperação e o Desenvolvimento Econômico (OCDE) consomem apenas metade, o que equivale às necessidades de cerca de 50 indivíduos. Confrontando esses dados com China e Índia, são consumidos um número de aproximadamente 9-30 vezes menor por pessoa do que em comparação aos Estados Unidos. Os países desenvolvidos têm sua prosperidade econômica fincada no consumo crescente de energia. (FAPESP, 2010). Adicionalmente, é esperado um aumento no consumo de energia no mundo todo, na casa dos 50% para o período de 2018 a 2050, segundo a Administração de Informações sobre Energia dos Estados Unidos e tendo como consequências o aumento dos gases de efeito estufa (GEE) e impactos nas mudanças climáticas (AIE, 2019).

Ademais, a rota para descarbonização dos setores econômicos mundiais enfrenta alguns grandes desafios (Graaf *et al.*, 2020). Exemplo disso são as indústrias que fazem uso de fornos, tendo em vista que não existem atualmente substitutos competitivos no mercado, bem como a vida útil desses equipamentos é de algo em torno de 20 a 30 anos e não é viável a substituição em médio prazo. A indústria de transporte pesado é outro exemplo de setor que enfrenta dificuldades na atingir as metas de carbono zero, alguns motivos inviabilizam tais medidas como o peso dos equipamentos e disponibilidade de pontos de carga, sendo que a eletrificação não se apresenta como uma alternativa viável para o setor (Gomes, 2023).

Decorrente dessa necessidade de reduzir os efeitos negativos das mudanças climáticas e viabilizar a transição energética, aumentando a participação das energias limpas no setor energético, a procura por tecnologias despoluídas aumentou substancialmente nos últimos anos. Assim, diante de tantos desafios, o hidrogênio verde surge como uma das alternativas (IEA, 2022; Fonseca, 2022; Sadik-Zada, 2021). É nesse cenário que o hidrogênio começa a ocupar um espaço de destaque, tendo em vista todas as potenciais possibilidades de sua utilização e aplicação como vetor energético para colocar em curso a referida transição e contribuir com a descarbonização mundial (Parra *et al.*, 2019).

3 Metodologia

O presente estudo caracteriza-se uma Revisão Sistemática da Literatura (RSL), fundamentada na lista de verificação “Preferred Reporting Items for Systematic Reviews” - PRISMA (Liberati *et al.*, 2009). Assim, a pesquisa configura-se de caráter exploratório. Este estudo também se caracteriza como descritivo, visto que serão descritas as características da amostra de estudos levantada. No que se refere à natureza do método, este estudo trata-se de pesquisa quantitativa, pois será feito um levantamento de informações com fim de obter resultados generalizáveis (Vieira, 2009).

Tendo em vista a natureza quantitativa desta pesquisa, se tratando de uma revisão sistemática, foram aplicadas técnicas estatísticas, a fim de mapear a produção científica na área estudada. Considerando ainda que há diversas formas de elaborar uma revisão sistemática da literatura, como as abordagens bibliométrica, meta-análise e integrativa, porém todas essas abordagens se preocupam em focar nos principais estudos que foram realizados, com intuito de caracterizar os padrões existentes nas características dos estudos ou possíveis limitações que existam nos campos de pesquisa (Carvalho *et al.*, 2013; Redondo *et al.*, 2017).

No que diz respeito ao levantamento das publicações para compor o estudo, foram escolhidas duas grandes bases multidisciplinares de pesquisas no âmbito nacional e

internacional, Scopus e Web of Science. A base Scopus faz parte do grupo Elsevier, que está entre as maiores bases de dados de citações e resumos no âmbito mundial e que possui caráter interdisciplinar e que engloba pesquisas de várias áreas como tecnologia, saúde, ciências sociais entre outras (ELSEVIER, 2021). Já a base Web of Science pertence ao *Institute for Scientific Information* a qual, assim como a outra base, tem grande relevância no cenário global e no Brasil pode ser acessada por meio da CAPES. Além do que, ambas as bases são compatíveis com o software utilizado na presente pesquisa: Vosviewer.

Para o levantamento, em junho de 2023 foi realizada a construção do objetivo da pesquisa sistemática, bem como a estratégia de busca dos documentos nas bases, utilizando a estratégia PICO e a escolha de palavras-chave consultadas nas bibliotecas Thesaurus da Unesco e EuroVoc. Essa construção está demonstrada na Figura 2.

Objetivo/problema	Qual o potencial de contribuição do hidrogênio verde na transição energética e redução de emissões?		
	P	I	Co
Extração	Transição energética	hidrogênio verde	redução das mudanças climáticas
Conversão	Energy transition	green hydrogen	reducing climate change
Combinação	Energy shortages; Energy crisis	Chemical elements	Environmental degradation
Construção	("Energy transition" OR "Energy shortages" OR "Energy crisis")	("Energy transition" OR "Energy shortages" OR "Energy crisis")	(climate change OR Environmental degradation)
Uso	("Energy transition" OR "Energy shortages" OR "Energy crisis") AND (green hydrogen OR "Chemical elements") AND (renewable sources OR "Renewable resources") OR "Energy resources") AND (climate change OR Environmental degradation)		

Figura 2. Estratégia de busca da revisão sistemática.

Este levantamento resultou em 17 publicações na base Web Of Science e 323 na Scopus, somando um total de 340 documentos encontrados. O software utilizado para gerenciar os artigos encontrados nas bases foi o Rayyan. Esse software além de permitir a aplicação de filtros como tipo de publicação, palavras-chave e base de dados, permite também que mais de um pesquisador possa tomar decisões sobre incluir ou não o estudo na pesquisa, bem como identifica os itens duplicados e realiza a exclusão desses itens. Na presente pesquisa foram encontrados 2 documentos duplicados.

A partir da leitura inicial dos 338 títulos e resumos (considerando que foram excluídos 2 duplicados), foram mantidos 37 documentos, pois identificou-se que 289 não atendiam ao objetivo da presente pesquisa e que existiam 4 documentos não-empíricos. Adicionalmente, como critério de exclusão foram retirados da amostra todos os documentos que não fossem artigos, dessa forma 8 foram excluídos. Dessa forma, os procedimentos aqui citados estão representados no fluxograma disposto na Figura 3.

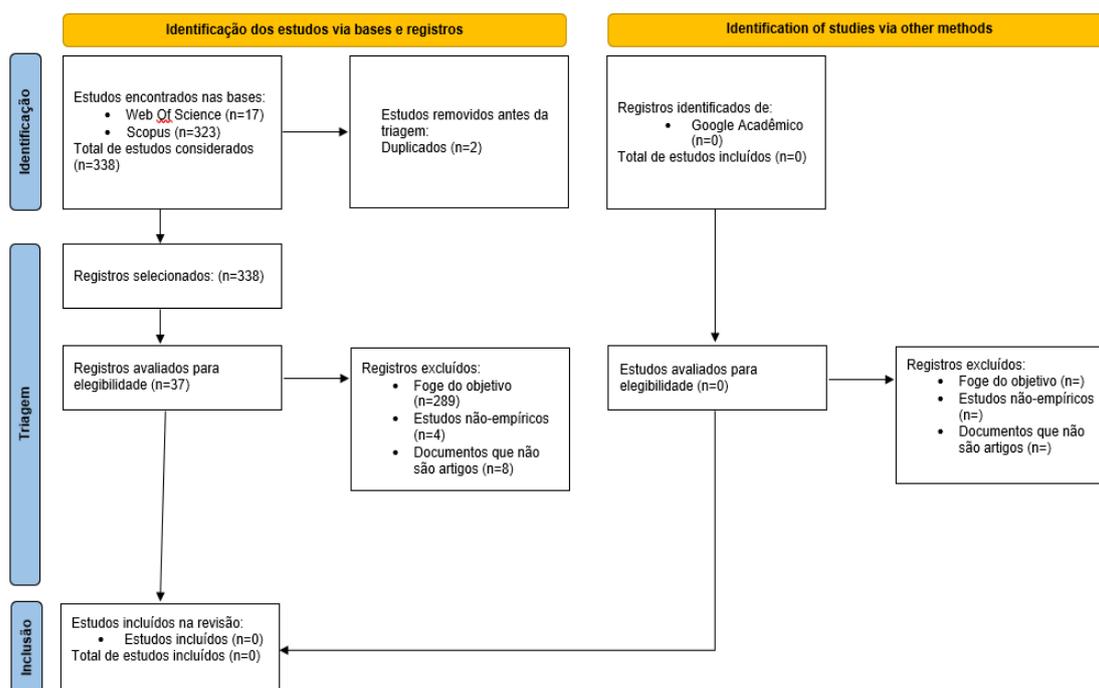


Figura 3. Diagrama de fluxo protocolo PRISMA.

Em relação à Figura 3, conforme é possível verificar, não foram extraídos dados do Google Acadêmico ou de outra fonte de base cinzenta e todos os documentos que foram considerados para a presente pesquisa pertencem às bases Web of Science e Scopus. Importante citar que esta revisão que considera o ano de 2023 foi realizada no mês de maio, portanto incluiu publicações até esta data.

No que diz respeito ao tratamento dos dados, foi utilizado o software VOSviewer, versão 1.6.19, o qual se trata de uma ferramenta que permite a construção e visualização de redes bibliométricas e que é compatível com várias bases, dentre elas as utilizadas no presente estudo. A ferramenta auxilia na identificação de clusters que são formados por autores, periódicos e países, que são construídos por meio de acoplamento bibliográfico, citações, cocitações e coautoria (Vosviewer, 2021).

4 Análise e discussão dos resultados

A quantidade de artigos coletados por ano de publicação está disposta na Figura 4. Neste gráfico é possível verificar que a maior quantidade de trabalhos publicados encontra-se no intervalo dos anos de 2020 a 2023, com um total de 31 artigos, compreendendo 83% do total de artigos, demonstrando que há uma tendência ao aumento do interesse pela temática. O ano de 2020 é o período coincidente com o ano em que foi declarada a pandemia de COVID-19 pela OMS, que dentre outras coisas, aumentou a preocupação mundial com a sustentabilidade, mudanças climáticas, dependência de combustíveis fósseis e busca por energias renováveis. Embora ainda esteja pouco consolidada a área de pesquisa em hidrogênio verde, nota-se o recente crescimento do interesse de pesquisa sobre esse assunto, sendo o ano de 2022 o pico do crescimento de publicações.



Figura 4. Quantidade de artigos coletados por ano de publicação.

Esse incremento constatado no número de publicações corrobora com Moreira *et al.* (2022) e Camargo *et al.* (2022), que em suas análises bibliométricas apontam que o crescimento de autores interessados na temática do hidrogênio verde se dá a partir de 2020, com pico de publicações entre 2021 e 2022.

Ao se analisar a coocorrência de palavras-chave nas 45 publicações, foi possível verificar um total de 144 palavras-chave, em que 18 dessas palavras apresentam o mínimo de 2 ocorrências. Na Figura 5 estão dispostos os clusters com a distribuição e conexão das palavras-chave. Os resultados obtidos estão compatíveis com os apresentados por Camargo *et al.* (2022).

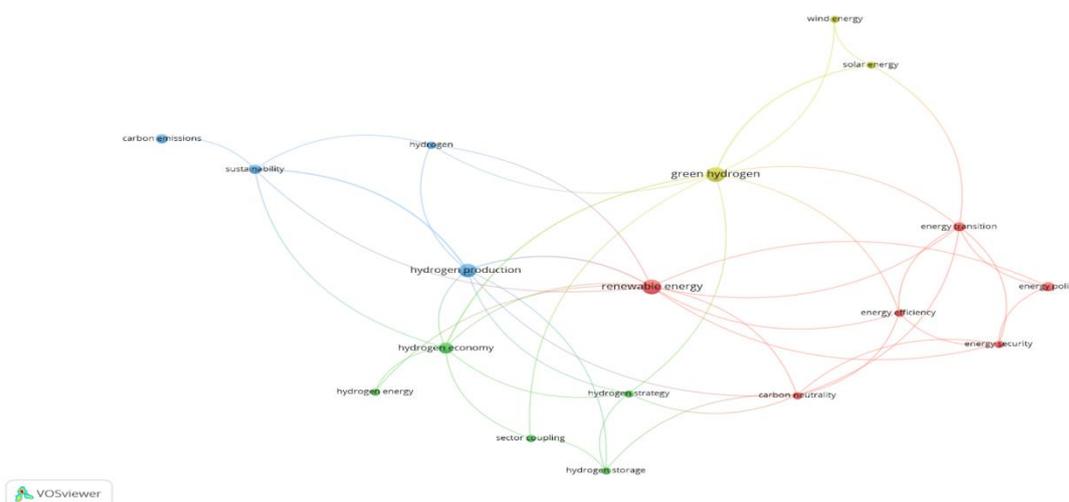


Figura 5. Output VOSviewer com a rede temática da co-ocorrência de palavras-chave.

O cluster azul compreende as palavras-chave: carbon emissions, sustainability, hydrogen, hydrogen production; o cluster verde é composto pelas palavras-chave: hydrogen economy, hydrogen energy, hydrogen strategy, sector coupling, hydrogen storage; já o cluster vermelho é formado pelas palavras-chave: renewable energy, energy efficiency, carbon neutrality, energy security, energy transition e energy policy; por fim, o cluster amarelo está constituído pelas palavras-chave: green hydrogen, wind energy e solar energy.

Cumprе destacar que o cluster azul trata de como a produção e aplicação do hidrogênio pode contribuir ou impactar na descarbonização do planeta. Já o cluster verde

aponta para a economia do hidrogênio verde, tratando de questões como estratégia, armazenamento, logística, distribuição e aplicação energética do hidrogênio. Por sua vez, o cluster vermelho está relacionado com a transição energética em si, discutindo a participação do hidrogênio nesse processo, sob a ótica da eficiência e segurança energética que faz parte da política energética de cada região. Finalmente, o cluster amarelo reúne os temas que abordam as fontes energéticas renováveis, a partir das quais o hidrogênio verde é gerado. Reforça-se que o hidrogênio só é considerado verde se produzido por meio de fontes de energias limpas como a solar e a dos ventos.

No que diz respeito à rede temática de coautoria, do total de referências identificadas em todos os artigos estudados, podem ainda ser contabilizadas as que mais apareceram. A partir dessas informações, foi possível construir a rede de coautoria, desenhada utilizando o software VOSviewer. A rede temática de coautoria está demonstrada na Figura 6:

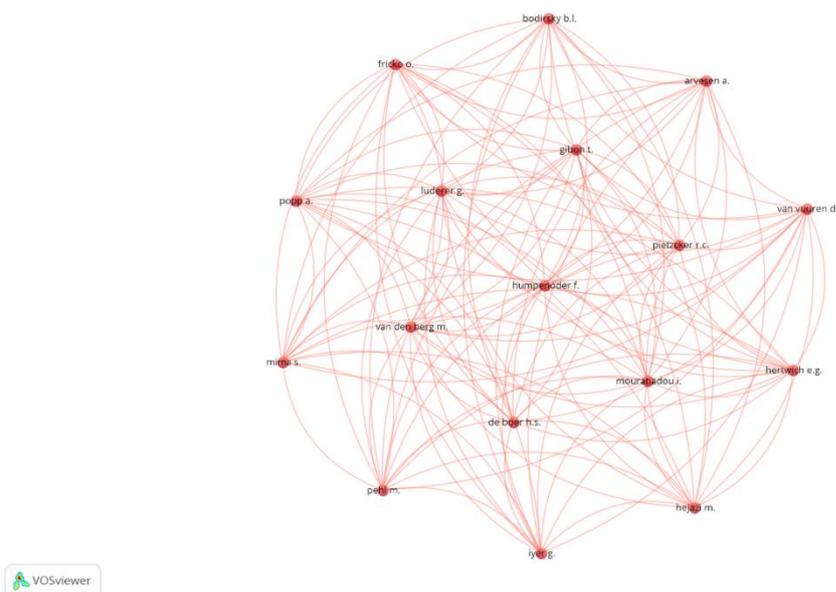


Figura 6. Output VOSviewer com a rede temática de coautoria.

A rede é constituída por 17 autores e representa a formação da rede de colaboração, por meio da coautoria entre os pesquisadores. Cumpre destacar que uma ligação da rede acontece quando um autor cita seu par, mesmo que não exista a recíproca, ou seja, tenha sido citado, bem como, essa ligação acontece quando ambos os autores citam o trabalho um do outro também. Adicionalmente, é importante frisar que quando um autor não aparece em ligação nenhuma é porque não foi possível estabelecer uma relação de coautoria com outros autores da mesma área de estudo.

Na formação da rede de coautoria foi considerado o quantitativo de colaboração e não a quantidade de artigos publicados. A representação da colaboração entre os pesquisadores não se mostrou tão forte em relação ao universo de artigos publicados. Dentre o total de 37 artigos no período de 2011 a 2023, apenas 17 continham colaboração entre si. Cabe destacar que à medida que a pesquisa sobre o hidrogênio verde continuar a crescer, conforme a tendência evidenciada na Figura 4, é provável que haja uma rede de coautoria mais complexa, com uma maior interconexão entre pesquisadores e suas contribuições para diferentes aspectos dessa temática.

A Figura 7 mostra a rede de cocitação entre os autores que publicaram artigos sobre a temática do hidrogênio verde. Entende-se que a frequência de citações entre autores possibilita que um domínio de conhecimento seja observado. Assim, a análise de citações

pretende compreender um campo científico, fazendo uso da forma principal com a qual a comunidade científica se legitima, isto é, as citações.

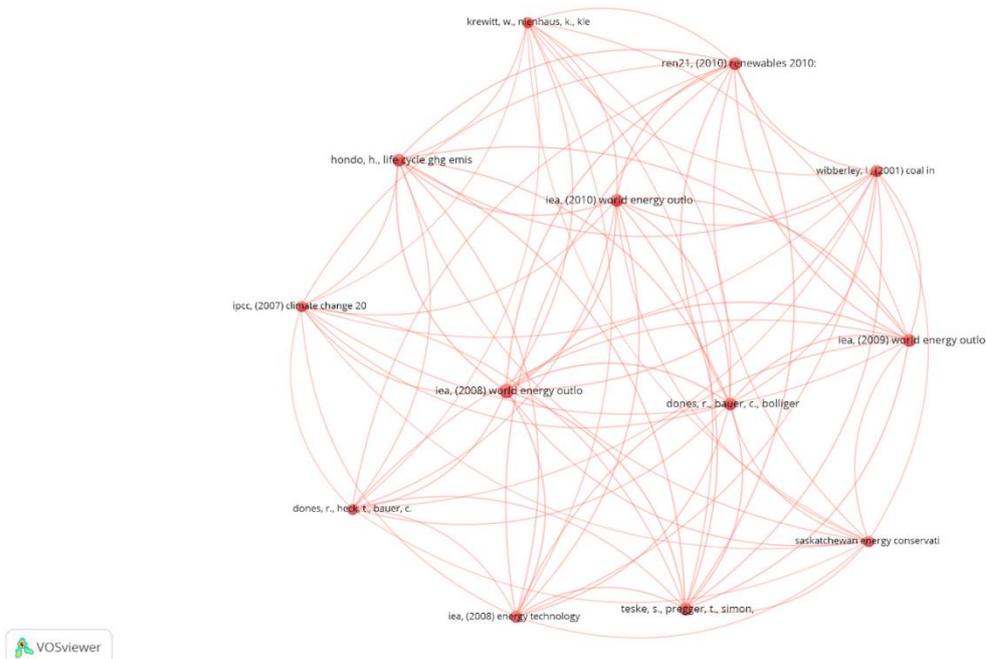


Figura 7. Output VOSviewer com a rede temática de cocitação.

A citação pode ser considerada uma medida objetiva da efetivação da comunicação científica, pois denota que um relato de pesquisa foi publicado, divulgado, acessado e utilizado para fins de nova investigação. A partir da análise das citações torna-se viável avaliar a inserção dos pesquisadores na comunidade científica estudada, identificando os pesquisadores mais relevantes, bem como os pesquisadores de vanguarda, que propõem o novo conhecimento na temática (Grácio & Oliveira, 2013).

A rede de cocitação apresentada é composta por 13 itens. Além dos autores mais relevantes que abordam a temática estudada, cabe destacar a referência a documentos produzidos por agências e iniciativas que tratam a questão da energia no contexto da sustentabilidade e das mudanças climáticas, notadamente a IEA – International Energy Agency e o IPCC — Intergovernmental Panel on Climate Change.

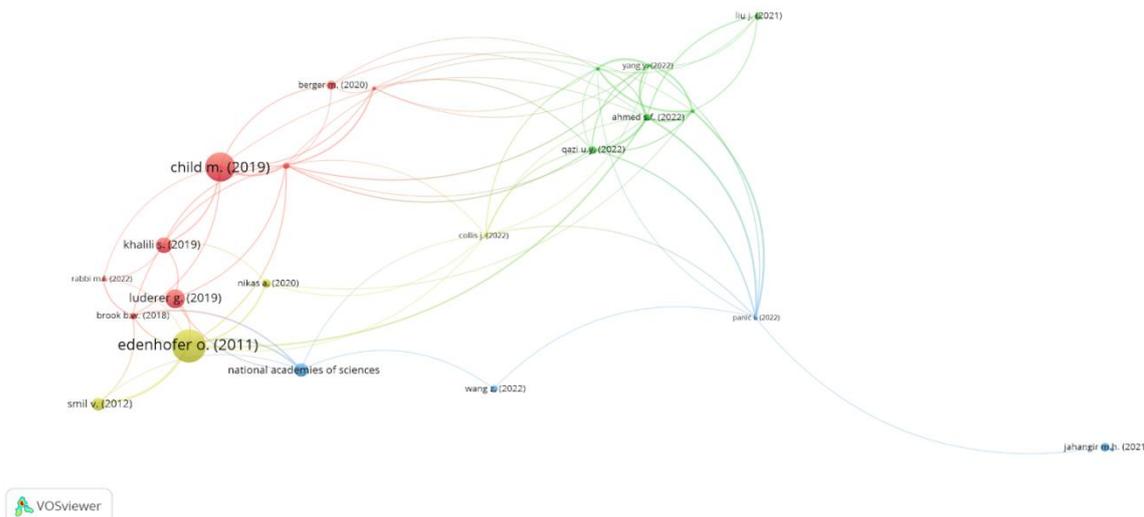


Figura 8. Output VOSviewer com a rede temática de acoplamento bibliográfico.

A rede de acoplamento bibliográfico por obra pode ser visualizada na Figura 8. Os resultados encontraram 4 clusters. O cluster vermelho é formado pelos autores: Child (2019), Luderer (2019), Khalili (2019), Rabbi (2022) e Brook (2019); o cluster amarelo aponta o relacionamento entre os autores: Edenhofer (2011), Smil (2012) e Nikas (2020); o cluster azul mostra como se relacionam os autores: National Academies of Science, Wang (2022) e Jahangir (2021); o cluster verde demonstra a relação entre Qazi (2022), Ahmed (2022), Yang (2022) e Liu (2021).

5 Conclusões

O presente artigo teve como objetivo geral a realização de uma revisão sistemática relacionada com a temática do hidrogênio verde e sua contribuição na transição energética e redução das mudanças climáticas, buscando organizar o conhecimento científico sobre o tema e as agendas de pesquisa. Com base na estratégia de busca descrita na metodologia, a amostra consiste em 37 artigos coletados nas bases científicas Web of Science e SCOPUS. A partir dos resultados coletados nas bases, há uma indicação do crescimento do número de artigos publicados a partir de 2020, período coincidente com o ano que foi deflagrada a pandemia de covid-19, que dentre outras coisas, aumentou a preocupação mundial com a sustentabilidade, mudanças climáticas, dependência de combustíveis fósseis e busca por energias renováveis. Embora ainda esteja pouco consolidada a área de pesquisa em hidrogênio verde, nota-se o recente crescimento do interesse de pesquisa nessa temática, sendo o ano de 2022 o pico do crescimento de publicações.

No que diz respeito à rede temática da co-ocorrência de palavras-chave, os principais resultados encontrados foram 4 clusters em que o cluster azul trata de como a produção e aplicação do hidrogênio pode contribuir ou impactar na descarbonização do planeta. Já o cluster verde aponta para a economia do hidrogênio verde, tratando de questões como estratégia, armazenamento, logística, distribuição e aplicação energética do hidrogênio. Por sua vez, o cluster vermelho está relacionado com a transição energética em si, discutindo a participação do hidrogênio nesse processo, sob a ótica da eficiência e segurança energética que faz parte da política energética de cada região. Por fim, o cluster amarelo reúne os temas que abordam as fontes energéticas renováveis, a partir das quais o hidrogênio verde é gerado.

Reforça-se que o hidrogênio só é considerado verde se produzido por meio de fontes de energias limpas como a solar e a dos ventos.

A representação da colaboração entre os pesquisadores não se mostrou tão consolidada em relação ao universo de artigos publicados, no período de 12 anos (2011 primeira publicação e 2023 última publicação), num total de 37 artigos, destes apenas 17 continham colaboração entre si. Já a rede de cocitação apresentada é composta por 13 itens. Além dos autores mais relevantes que abordam a temática estudada, cabe destacar a referência a documentos produzidos por agências e iniciativas que tratam a questão da energia no contexto da sustentabilidade e das mudanças climáticas, notadamente a IEA – International Energy Agency e o IPCC — Intergovernmental Panel on Climate Change.

Como limitações da pesquisa, ressalta-se o fato de terem sido utilizadas apenas 2 bases de dados. Além do que, tendo em vista que a revisão sistemática é uma metodologia que tem a necessidade de seu corpus ser composto por trabalhos publicados, o que pode gerar um viés de publicação, considerando que trabalhos que não tenham resultados relevantes ou negativos podem não ter sido publicados e assim pode haver uma supervalorização dos resultados da utilização do hidrogênio verde.

Como sugestão de pesquisas futuras, identificou-se a necessidade de: (a) Investigar como os debates sobre o transporte do hidrogênio em gasodutos pode ser discutida com a população antes de ser inserida na agenda de tomada de decisão pública; (b) Explorar como o hidrogênio verde contribui para gerar ambientes de tecnologia e inovação nas cidades e como isso pode impactar na competitividade delas; (c) Examinar como o hidrogênio verde pode contribuir para melhorar a eficiência e a qualidade dos serviços de energia; (d) Investigar quais são os fatores críticos para a implementação do hidrogênio verde na cadeia global de energia; (e) Investigar como o hidrogênio verde pode contribuir para reduzir as desigualdades sociais de regiões que são historicamente subdesenvolvidas, como no caso da região nordeste do Brasil, por exemplo.

Ainda, tendo em vista que o hidrogênio verde exige das nações que elas possuam um sistema de tecnologia e inovação robusto, principalmente considerando os altos custos envolvidos na sua produção, ou seja, quem conseguir, por meio do investimento em tecnologia e inovação, construir formas menos onerosas de produzir o h₂v, largará na frente nessa corrida. Considerando isso, uma lacuna de pesquisa também que se sugere é como o hidrogênio verde contribui para a construção de sistemas de inovação e tecnologia, sendo utilizadas teorias como Triângulo de Sábado, o Sistema Nacional de Inovação (SIN) e hélice tripla e quádrupla.

Referências

Barbieri, J. C. *et al.* (2010). Inovação e Sustentabilidade: Novos Modelos e Proposições. *Revista RAE*, FGV.

Bezerra, F. D. (2021). Hidrogênio Verde: nasce um gigante no setor de energia. *Caderno Setorial ETENE*. URL: <https://www.bnb.gov.br/s482-dspace/handle/123456789/1109>.

Camargo, L. *et al.* (2022). Bibliometric Analysis of Global Trends around Hydrogen Production Based on the Scopus Database in the Period 2011–2021. *Energies*, 16(1), 87; <https://doi.org/10.3390/en16010087>.

Carayanis, E. G. & Campbell, D. F. J. (2010). Triple Helix, Quadruple Helix and Quintuple Helix and How Do Knowledge, Innovation and the Environment Relate To Each Other?: A

Proposed Framework for a Trans-disciplinary Analysis of Sustainable Development and Social Ecology. *International Journal of Social Ecology and Sustainable Development*, 1(1), 41–69. doi:10.4018/jsesd.2010010105.

Carvalho, D. W. & Barbosa, K. S. (2019). Litigância climática como estratégia jurisdicional ao aquecimento global antropogênico e mudanças climáticas. doi:10.5102/rdi.v16i2.5949.

Castro, N. D. & Leal, L. M. (2022). *COP 27: Transição Energética e o Hidrogênio Verde no Brasil. Broadcast Energia*. URL: <https://gesel.ie.ufrj.br/artigo-gesel-cop-27-transicao-energetica-e-o-hidrogenio-verde-no-brasil/>

Castro, N. D. & Santos, V. (2022). Contextos e Estratégias do Programa Nacional de Hidrogênio do Brasil. *Broadcast Energia*. URL: https://gesel.ie.ufrj.br/app/webroot/files/publications/59_castro_2021_05_16.pdf

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.

Confederação Nacional da Indústria. (2022). *Hidrogênio sustentável: perspectivas e potencial para a indústria brasileira*. Brasília: CNI. URL: <https://www.portaldaindustria.com.br/publicacoes/2022/8/hidrogenio-sustentavel-perspectivas-e-potencial-para-industria-brasileira/>

Fonseca, R. G. (2022). A era do hidrogênio verde no século XXI. Meio Ambiente e Economia: a urgência de percebê-los como ecossistema integrado. *Revista Inovação e Desenvolvimento*, 1(8). URL: <https://revistainovacao.facepe.br/index.php/revistaFacepe/article/view/87>

Delgado, F. *et al.* (2022). A transição energética no setor de transportes para nações em desenvolvimento: A perspectiva brasileira. *Cadernos FGV Energia*, (15). ISSN: 2358-5277.

Delgado, F. & Costa, A. M. (2021). Os caminhos do país na construção da economia global do hidrogênio. *Revista Conjuntura Econômica*, 75(3), 38-42.

Dunn, S. (2002). Hydrogen futures: Toward a sustainable energy system. *International Journal of Hydrogen Energy*, 27(3), 235-264.

Empresa de Pesquisa Energética - EPE. (2021). *Bases para a consolidação da estratégia brasileira do hidrogênio: revisão 1*. URL: [https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-569/NT_Hidrogeno%CC%82nio_rev01%20\(1\).pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-569/NT_Hidrogeno%CC%82nio_rev01%20(1).pdf)

Elsevier. (2021). *Banco de dados de resumos e citações organizados por especialistas*. URL: <http://www.elsevier.com/pt-br/solutions/scopus>

Euler, A. M. (2016). O Acordo de Paris e o futuro do REED+ no Brasil. *Cadernos Adenauer*, n. 2. URL: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1055679/o-acordo-de-paris-e-o-futuro-do-redd-no-brasil>

- Fernandes, G. *et al.* (2023). Panorama dos desafios do hidrogênio verde no Brasil. *FGV Energia*. URL: https://bibliotecadigital.fgv.br/dspace/bitstream/handle/10438/33175/opinioao_artigo_hidrogenio_verde_matriz.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Gomes, I. (2023). *O papel do Brasil na produção de hidrogênio verde*. Editora Brasil Energia. URL: <https://editorabrasilenergia.com.br/o-papel-do-brasil-na-producao-de-hidrogenio-verde/>
- Graaf, T. V. D. *et al.* (2020). The new oil? The geopolitics and international governance of hydrogen. *Energy Research & Social Science*, 68, 101667.
- Grácio, M. C. C. & Oliveira, E. F. T. (2011). Produção e comunicação da informação em CT&I – GT7 da ANCIB: análise bibliométrica no período 2003/2009. *Liinc em Revista*, 7(1), 248–263.
- Hydrogen Council. (2017). *Hydrogen scaling up*. A sustainable pathway for the global energy transition Working Paper.
- IEA - International Energy Agency. (2022). *Global Hydrogen Review*. URL: <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2022>
- IEA – International Energy Agency. (2021). Deployment Status of Fuel Cells in Road Transport: 2021 Update.
- IRENA. (2020). *Global Renewables Outlook: Energy transformation 2050*.
- Liberati, A. *et al.* (2009). The PRISMA statement for reporting systematic reviews and meta-analyses of studies that evaluate health care interventions: explanation and elaboration. *Journal of Clinical Epidemiology*, 62(10).
- Li, R., Wang, W. & Xia, M. (2017). Cooperative planning of active distribution system with renewable energy sources and energy storage systems. *IEEE Access*, 6, 5916–5926.
- Maggio, G. *et al.* (2019). How the hydrogen production from RES could change energy and fuel markets: A review of recent literature. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(23), 11371-11384.
- Moreira, D. A. *et al.* (2022). Litigância climática e licenciamento ambiental: consideração da variável climática à luz dos tratados internacionais sobre o clima. *Revista de Direito Internacional*. doi: 10.5102/rdi.v19i1.7937.
- Moreira, M. Z. *et al.* (2022). Economia do hidrogênio verde e desenvolvimento sustentável: agenda de pesquisa com base em bibliometria de dados da Scopus. *XXIV Engema*. ISSN: 2359-1048.
- Oliveira, R. C. (2022). *Panorama do hidrogênio do Brasil*. Texto para discussão. Brasília: IPEA.

ONU BR. (2021). Nações Unidas No Brasil. *A ONU e o meio ambiente*. URL: <https://brasil.un.org/pt-br/91223-onu-e-o-meio-ambiente>

Parra, D. et al. (2019). A review on the role, cost and value of hydrogen energy systems for deep decarbonisation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 101, 279-294.

PwC. (2022). *Net Zero Economy Index 2022*. URL: <https://www.pwc.co.uk/services/sustainability-climate-change/insights/net-zero-economy-index.html>

Sadik-Zada, E. R. (2021). Political Economy of Green Hydrogen Rollout: A Global Perspective. *Sustainability*, 13(23), 13464.

Ueckerdt, F. et al. (2021). Potential and risks of hydrogen-based e-fuels in climate change mitigation. *Nature Clim. Change*, 11(5), 384–393. URL: <https://www.nature.com/articles/s41558-021-01032-7>

U.S. Energy Information Administration. (2019). *International Energy Outlook 2019*. URL: <https://www.eia.gov/outlooks/ieo/>

Vosviewer. (2023). *Welcome to VOSviewer*. URL: <http://www.vosviewer.com>.