

UMA ANÁLISE ESTATÍSTICA SOBRE A PESQUISA CIENTÍFICA E A PROJEÇÃO ENERGÉTICA DO HIDROGÊNIO VERDE A NÍVEL GLOBAL NOS ÚLTIMOS CINCO ANOS

 <https://doi.org/10.56238/arev6n3-222>

Data de submissão: 18/10/2024

Data de publicação: 18/11/2024

Marcos Fernandes de Oliveira

Mestre em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade, IFGoiano-Campus Rio Verde
E-mail: marcos.fernandes1@estudante.ifgoiano.edu.br
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7693-860X>
LATTES: <http://lattes.cnpq.br/7091151699209555>

Carlos Frederico de Souza Castro

Doutor em Química, IFGoiano-Campus Rio Verde
E-mail: carlos.castro@ifgoiano.edu.br
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9273-7266>
LATTES: <http://lattes.cnpq.br/6519321142404132>

Dener Márcio da Silva Oliveira

Doutor, Universidade Federal de Viçosa
E-mail: dener.oliveira@ufv.br
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9514-9147>
LATTES: <http://lattes.cnpq.br/7905822891118702>

Aristeu Gomes Tininis

Doutor em Química
IF-Matão
E-mail: Aristeu.sp@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1731-7149>
LATTES: <http://lattes.cnpq.br/8337771861251036>

Daiany de Almeida Araujo

Mestra em Agroquímica, IFGoiano-Campus Rio Verde
E-mail: daiany.araujo@estudante.ifgoiano.edu.br
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5986-3850>
LATTES: <http://lattes.cnpq.br/7230463054395580>

Lígia Gabriela de Sá Vanin

Mestra em Agroquímica, IFGoiano-Rio verde
E-mail: ligiavanin@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4123-3842>
LATTES: <http://lattes.cnpq.br/5182684921498429>

Cláudia Regina Cançado Sgorlon Tininis

Doutora em Química, IF-Matão
E-mail: Sgorlonif@ifsp.edu.br
LATTES: <http://lattes.cnpq.br/1366193935168737>

Jéssica Nívea Magalhães Rodrigues

Bacharel em Agronomia IFGoiano-Campus Rio Verde

E-mail: jessicanivea@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-0946-1498>

LATTES: <http://lattes.cnpq.br/9932370138534382>

Renata Ferreira Costa

Bacharel em Agronomia IFGoiano-Campus Rio Verde

E-mail: renata.costa1@estudante.ifgoiano.edu.br

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-2851-3763>

LATTES: <https://lattes.cnpq.br/5651032626318347>

Elizabeth Campos Cruvinel

Bacharel em Agronomia, IFGoiano-Campus Rio Verde

E-mail: ec7371565@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-8605-010x>

LATTES: <http://lattes.cnpq.br/1701242794258987>

RESUMO

Buscar fontes energéticas de baixo volume de emissões de carbono, tem impulsionado o mercado energético e a pesquisa científica global. Partindo deste ponto, o objetivo deste estudo, é de verificar com auxílio de uma análise bibliométrica o andamento de pesquisa sobre renovação energética tendo como base a produção de hidrogênio verde, a capacidade instalada, as instituições acadêmicas que se encontram na vanguarda deste movimento, autores e periódicos que têm dado ênfase ao assunto. A metodologia empregada foi fundamentada em pesquisa bibliométrica elaborada com apoio do pacote de dados bibliometrix através do software RStudio, realizada nas bases de dados Scopus e Web of Science. Expressões de busca (“green hydrogen”) and (“low carbon emission”) or “decarbonization” or “greenhouse gases”, foram empregadas visando alcançar o maior raio de ação possível, essas expressões foram filtradas com base inicial no período temporal entre 2019-2024, seguido do filtro de artigos de revisão, artigos de conferência, de acesso aberto, escritos em inglês. Foram levantados 913 estudos, com 8 artigos duplicados e ao final restaram 885 artigos únicos que se encaixavam ao tema, as expressões de busca e aos filtros colocados. Observou-se inicialmente um crescimento anual de busca de 128%, onde os maiores assuntos pesquisados foram a produção de hidrogênio, combustíveis fósseis, baixo carbono, eletrolise, armazenamento de hidrogênio, hidrogênio verde.

Palavras-chave: Pesquisa Acadêmica. Mercado Energético. Autores. Artigos. Periódicos.

1 INTRODUÇÃO

O alerta global de alterações climáticas provenientes de emissões de gases de efeito estufa, derivaram em uma série de consequências que tem provocado a pesquisa científica à busca de soluções. Visando buscar um desenvolvimento socioeconômico com a interação em soluções ambientalmente estáveis e de menor consumo de recursos naturais (SHAO, 2024).

A busca por combustíveis com menor volume de emissões atmosféricas, como por exemplo a utilização de oleofinas derivadas de pirólise catalítica de resíduos plásticos como combustível (GOSHAYESHI et al., 2024), fontes renováveis de baixo carbono como a lignina (KUMAR et al., 2024), etanol (DONG et al., 2024), além da utilização em escala crescente da energia fotovoltaica (GHASABAN et al, 2025), são algumas das ações que vêm sendo buscadas com o propósito de otimizar a produção, ao mesmo tempo priorizar a sustentabilidade (SALMANI MARASHT et al, 2024).

HERRANDO et al.,(2023) em seu estudo, discorrem sobre a importância da implementação de energias renováveis visando mitigar emissões de carbono, o que é salutar, pois remete a necessidade latente e urgente, de atenuar impactos antrópicos e redução de emissões de CO₂. Quando se fala em impactos antrópicos, é preciso pensar em todos os pontos do processo, a dependência de matriz energética não renovável (ABED et al., 2024), o alto consumo de energia para produção, a existência de programas de reciclagem e a baixa adesão a eles por parte da população (YANG et al., 2023), todos estes gargalos vão se aglutinando de tal forma a se tornar também um problema de saúde pública. São desafios que necessitam de enfrentamento mais pragmático dos agentes de todo o processo, indústrias, comércio, gestores políticos, consumidores.

Mediante aos dados apresentados, se observa que a proposta de implementação da economia circular (GODE et al, 2024), projetos de reciclagem de resíduos sólidos de baixa eficácia (TAOUAHRIA, 2024), embora relevantes, não conferem resultados satisfatórios ao propósito de mitigar emissões de CO₂ pelo planeta (GUO et al, 2023). Descarbonizar, como propõem (HERNANDEZ et al., 2024), já não se trata de ensejo utópico e sim necessidade. Surge então, como alternativa viável, a produção de “hidrogênio verde” como fonte alternativa da matriz energética (KHOSRAVITABAR et al, 2024), sendo técnicas que combinadas podem apresentar relevantes resultados imediatos e sustentáveis, devido a sua versatilidade e adaptabilidade que são os componentes essenciais de um futuro energético.

A perspectiva do hidrogênio verde como combustível substituto da matriz fóssil (AHMAD et al., 2024) e (HASSAN et al, 2024), demonstra a capacidade deste produto como fonte limpa e renovável, tem se tornado cada vez mais promissora e real. É bem verdade que a proposta do hidrogênio verde como combustível é auspiciosa (ABDIN et al., 2020), demanda diversos esforços em

pesquisa e desenvolvimento, colaboração entre pesquisadores para transferência e investimento tecnológico para aumentar a viabilidade na produção de hidrogênio.

Um gargalo produtivo para o hidrogênio está no alto consumo energético de seus eletrolisadores que são os captadores e alimentadores do processo de eletrólise do hidrogênio (WANG et al., 2024), sua necessidade de estabilidade da corrente elétrica para uma produção otimizada. Para tal, estratégias controle de utilização energética têm sido pesquisadas e exploradas para dirimir estes pontos críticos (RAHMAN et al, 2024), a degradação do eletrolisador também é um fator que também chama à atenção de seu uso em altas temperaturas e não havendo estabilidade de corrente paradas e reinícios são constantes levando a perda de capacidade produtiva (KUANG et al., 2024).

O custo tecnológico para implementar um sistema de produção do hidrogênio é alto. Com vistas a reduzir a mitigar este gargalo(ZHOU et al, 2024), apresentam um estudo onde a flutuação energética é resolvida com o acoplamento de módulo fotovoltaico ao sistema, também, formaliza-se cada vez mais tecnologias mais sustentáveis para produção mais limpa (QI et al., 2023), onde um sistema dinâmico de eletrólise alcalina eleva condições operacionais de produção. Observa-se então que a tecnologia demanda energia constante, uma modelagem de otimização dos multi eletrolisadores (WANG et al., 2024), além de modelagens matemáticas mais precisas (HÜNER, 2024).

Observa-se então que a proposta de utilização em larga escala do hidrogênio verde é salutar, tem enfrentado desafios que a pesquisa busca através de interações entre pesquisadores as resoluções, e que o consumo energético para produção é alto e necessita de alternativas estratégicas. Assim, este estudo analítico tem o objetivo de levantar as informações atuais sobre o andamento da pesquisa sobre este tema acima apresentado, o crescimento das buscas na literatura que se converterão em novos estudos, os pesquisadores empenhados neste propósito, suas parcerias de pesquisa, como também as instituições originadoras de novas pesquisas e os frutos do trabalho na forma de inovações e artigos publicados em periódicos consolidados ao longo do planeta.

2 METODOLOGIA APLICADA

Para execução deste estudo específico, foi realizada uma pesquisa nas bases de dados Scopus e Web of Science com as seguintes expressões de busca: (“green hydrogen”) and (“low carbon emission”) or “decarbonization” or “greenhouse gases”, pois estas expressões abordam de forma sintetizada o que se pretende nesta análise bibliométrica. A amplitude temporal de busca foi definida pelos últimos cinco anos (2019-2024), foram aceitos trabalhos em inglês, somente artigos, sendo excluídos capítulos de livros, livros, anais de conferências.

Ao todo foram encontrados 913 trabalhos, distribuídos em 479 arquivos brutos na Scopus e 414 na Web of Science, que após retirada de 8 arquivos duplicados resultaram em 885 estudos que compõem este trabalho de análise bibliométrica. Os arquivos foram obtidos em pesquisa realizada a base de periódicos Capes, exportados para o software Rstudio, tratados, filtrados, e por último agrupados pela função Biblioshiny do pacote de dados Bibliometrix do referido software, de onde foi obtido relatório que compõe a análise bibliométrica que se segue neste estudo.

A construção do raciocínio nos textos de apoio foi fundamentada em expressões de busca tais como: (“keywords”) and (“scientific relevance”), (“authors”) and (“relevance of publications”), (“scientific research”) and (“logical foundation”), (“cluster formation”) and (“scientific relevance”), (“trend map”) and (“scientific research”), levantados na bases Wiley, Springer Nature, Scopus, Web of Science, apoiando-se na amplitude temporal de anos (2016-2024), essa variação de três anos explica-se em função de o assunto hidrogênio verde como fonte energética já não ser uma tecnologia totalmente desconhecida do meio científico.

3 RESULTADOS

As informações principais contidas no objeto gerador do arquivo com os 885 artigos estão dispostas na Figura 1 abaixo, são relacionadas as fontes de pesquisa, afiliações, palavras-chave do autor, além da quantidade de estudos levantados, o crescimento anual de busca, média de citações e o tempo médio de cada artigo.

Figure 1 - Principais informações obtidas em relação a documentos, crescimento anual, espaço temporal, fontes, autores, palavras-chave de autores, coautoria internacional, média de coautores por documento, idade de documentos

Fonte:



Relatório Biblioshiny

Com apenas 8 artigos duplicados em um total de 913 artigos pesquisados, este estudo apresenta um relevante interesse da comunidade científica a respeito do tema sugerido nas expressões de busca

anteriormente mencionadas. A taxa de crescimento anual foi 128% ao ano e parte do interesse na busca por fontes renováveis e alternativas para a matriz energética existente dos combustíveis fósseis. Os documentos têm um bom percentual de citações 16,38 por documento, assim como a coautoria internacional de 15,25% indicando as relações de pesquisadores, além de uma baixa idade média por documento de 1,64 anos, reforçando a atualidade do tema no cenário de pesquisa.

A Tabela 1 a seguir traz um demonstrativo de produção anual de artigos relacionados ao tema, há um volume de produções baixo em 2019, justificável por ser período relacionado à Covid-19, o salto para os anos posteriores é bem definido no crescimento anual anteriormente apresentado, muito embora uma linha de tendência seja criada à medida que há aumento de publicações observadas pelo número de citações, nota-se um decréscimo de citações média de citações por ano.

Tabela 1- Citações relacionadas por autor/ano dos estudos pesquisados, englobando a média por artigos e a média de citações anuais.

Ano	Média de citações por artigo	Número de citações	Média de citações por ano	Citações anuais
2019	509	3	84,83	6
2020	31,95	87	6,39	5
2021	32,63	129	8,16	4
2022	17,64	220	5,88	3
2023	6,8	258	3,4	2
2024	1,82	188	1,82	1

Fonte: Relatório Biblioshiny

3.1 FONTES PESQUISADAS

Foram obtidas 459 fontes de pesquisa, como já discutido anteriormente, apenas artigos científicos relacionados nesta análise bibliométrica. A Tabela 2 abaixo apresenta as 10 primeiras fontes obtidas neste estudo, trata-se apenas de uma apresentação reduzida do total de fontes, como também uma visualização mais enxuta da importância do periódico na construção de uma tendência científica.

Tabela 2- Recorte originado do relatório biblioshiny, apresentando apenas 10 fontes e as quantidades de artigos publicados nestas referidas fontes

Fontes	Artigos
INTERNATIONAL JOURNAL OF HYDROGEN ENERGY	57
ENERGIES	37
JOURNAL OF CLEANER PRODUCTION	31
APPLIED ENERGY	19
ENERGY	17
FUEL	16

ENERGY CONVERSION AND MANAGEMENT	15
MATERIALS TODAY-PROCEEDINGS	11
ENERGY POLICY	10
CHEMICAL ENGINEERING JOURNAL	9

Fonte: Relatório Biblioshiny

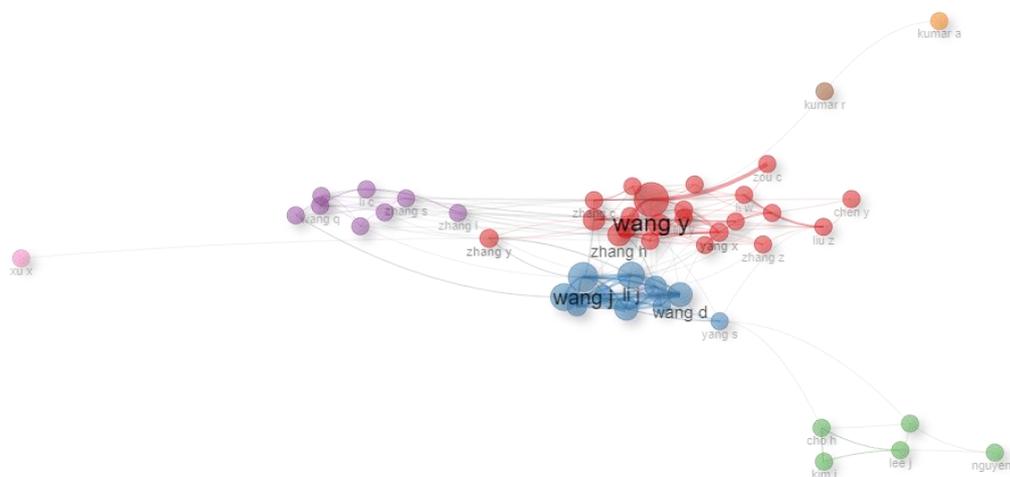
3.2 AUTORES RELEVANTES, PRODUÇÃO AO LONGO DO TEMPO, TRABALHOS MAIS CITADOS GLOBALMENTE

As informações principais contidas e apresentadas na Figura 1 desta análise, apontam uma coautoria de 4,78 pesquisadores por trabalho publicado (GU et al., 2017). Esta relação de crescimento apontado anteriormente se fundamenta em pontos cruciais e aspectos relevantes a uma boa pesquisa científica. A abordagem conceitual é facilitada por uma vasta disponibilidade de dados e informações atuais dentro da pesquisa científica proporcionada por periódicos com índices de indexação bastante criteriosos e confiáveis (KONG et al., 2019) e (HACKMAN et al, 2024), proporcionando destaque a autores, favorecendo maior número de publicações e relevância de documentos conforme apontado em recorte do documento original do relatório na Tabela 3 abaixo, onde apenas 22 fontes são destacadas divididas entre três autores.

Tabela 3-Recorte do relatório biblioshiny, contemplando autores, produções anuais, fontes, DOI e total de citações por documentos

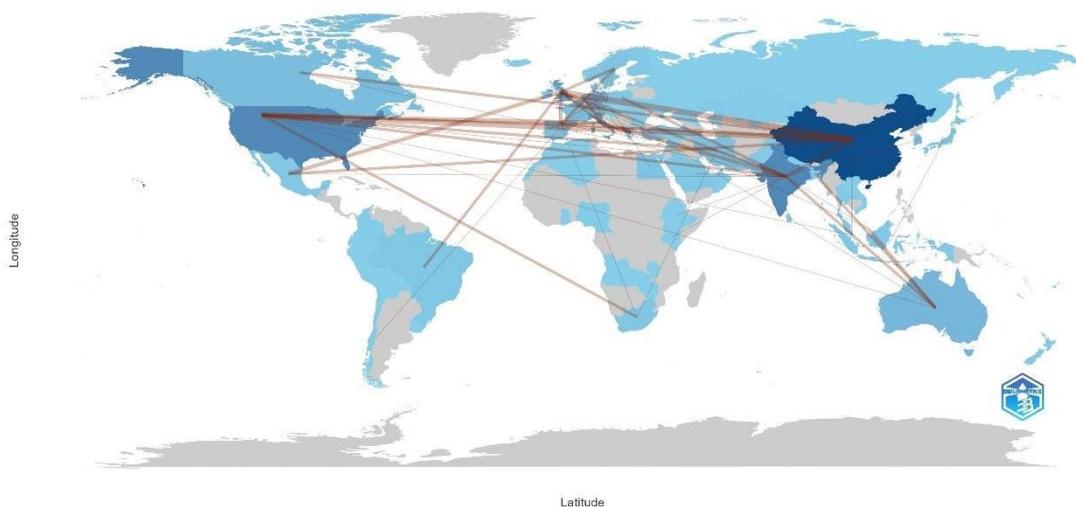
Autor	Ano	DOI	Total de citações	Citações por ano
WANG Y	2024	10.1016/j.watres.2024.121576	9	9
WANG Y	2024	10.1016/j.gee.2023.02.011	9	9
WANG Y	2024	10.1016/j.applthermaleng.2024.123067	3	3
WANG Y	2024	10.1016/j.jechem.2023.11.026	8	8
WANG Y	2024	10.1016/B978-0-443-28824-1.50158-7	0	0
WANG Y	2023	10.1016/j.seppur.2023.123957	10	5
WANG Y	2023	10.11896/cldb.22040218	0	0
WANG Y	2023	10.1007/s40843-023-2608-6	3	1,5
WANG Y	2023	10.1360/TB-2023-0531	2	1
WANG Y	2022	10.1016/j.energy.2022.123181	10	3,33333333
WANG Y	2022	10.1080/27658511.2022.2062824	17	5,66666667
WANG Y	2021	10.1016/j.mtphys.2021.100551	5	1,25
WANG Y	2021	10.1016/j.jcis.2021.02.005	34	8,5
WANG Y	2021	10.11698/PED.2021.02.18	125	31,25
WANG Y	2021	10.1016/j.ngib.2021.08.009	84	21
WANG Y	2021	10.13228/j.boyuan.issn0449-749x.20210170	6	1,5
WANG Y	2021	10.3787/j.issn.1000-0976.2021.08.005	50	12,5
WANG Y	2021	10.1016/S1876-3804(21)60039-3	324	81

Figure 5 - Rede de Colaboração entre autores, destaques entre colaboração para Wang W, Zhang H, Yang X, Zhang Z, com Zhang Y, Zhang I e Zhang S a esquerda, abaixo com Wang J, Li J, Wang D.



Fonte: Informações segundo relatório gerado pelo biblioshiny

Figura 6- Mapa de colaboração mundial relacionado a este estudo, coloração azul-escuro indica maiores índices de colaboração, à medida que a cor é menos intensa, menor a colaboração entre países



Fonte: Informações segundo relatório gerado pelo biblioshiny

O Levantamento gerador desta análise, com base na extração, purificação de dados e revisão de literatura, mostra que foram compartilhadas 317 publicações, envolvendo 70 países citados que buscaram através da cooperação dados com 37 nações ampliar uma rede de colaboração global sobre os temas e tendências pesquisadas. A China se destacou com o maior número de publicações, sendo 49 artigos compartilhados por 24 autores. Mas, a França apresentou 16 publicações compartilhadas com 6 países, obtendo maior número de compartilhamento e a Suécia foi a que mais interagiu, mantendo contato com 8 países e 13 publicações. No entanto, os pesquisadores do Reino Unido lideram em relação aos que mais contribuíram, com 47 artigos e o maior compartilhamento de

informações foi para o México e a França com 4 produções, seguido pelo Brasil, Grécia e a Suécia com 3 publicações, conforme é demonstrado na Tabela 4 abaixo.

Tabela 4 – Apresentação via tabela de recorte obtido em relatório do pacote Bibliometrix através do biblioshiny, onde é demonstrada a rede de colaboração entre países com os respectivos estudos compartilhados e sua frequência.

From	To	Frequency
AUSTRALIA	BANGLADESH	3
AUSTRÁLIA	DENMARK	1
AUSTRALIA	INDONESIA	1
AUSTRALIA	IRELAND	1
AUSTRALIA	LAOS	1
AUSTRALIA	MALAYSIA	3
AUSTRALIA	NORWAY	1
AUSTRALIA	PAKISTAN	1
AUSTRALIA	SAMOA	1
AUSTRALIA	SINGAPORE	1
AUSTRALIA	TURKEY	1
AUSTRALIA	U ARAB EMIRATES	1
AUSTRALIA	VANUATU	1
BELGIUM	CAMEROON	1
BRAZIL	AUSTRIA	1
CANADA	BANGLADESH	1
CANADA	IRAN	1
CANADA	NETHERLANDS	1
CANADA	U ARAB EMIRATES	1
CHINA	ANGOLA	1
CHINA	AUSTRALIA	1
CHINA	BANGLADESH	1
CHINA	BELGIUM	1
CHINA	CANADA	3
CHINA	DENMARK	1
CHINA	ETHIOPIA	1
CHINA	FRANCE	3
CHINA	GERMANY	1
CHINA	GHANA	1

Fonte: Informações segundo relatório gerado pelo biblioshiny

4 TRANSIÇÃO ENERGÉTICA GLOBAL E PERSPECTIVAS

4.1 TRANSIÇÃO ENERGÉTICA GLOBAL

Até o presente momento, a disposição da literatura aponta para a necessidade da transição energética da matriz atual para fontes renováveis que não emitam tantos gases de efeito estufa quanto os combustíveis fósseis (SHANG et al., 2024). A elevação da temperatura da Terra em função das

emissões antrópicas é um fator significativo para a aceleração da transição energética (USMAN et al, 2022).

Sendo assim, como foi apresentado até aqui por essa análise bibliométrica, o papel da discussão, transferência tecnológica, e colaboração de pesquisa são cruciais neste momento que o planeta vive para encontrar viabilidade técnica e financeira na implementação de fontes renováveis de energia (ADEDYOYIN et al., 2021; HANIF et al, 2019; QAMRUZZAMAN et al, 2020).

O sucesso da transição energética depende de uma transformação do setor energético global de fontes fósseis para fontes de carbono zero até a segunda metade deste século, reduzindo as emissões de CO₂ relacionadas à energia para mitigar as mudanças climáticas e limitar a temperatura global a 1,5° dos níveis pré-industriais (IRENA, 2023).

Figura 7-Geopolítica global para produção e distribuição de hidrogênio, destacando importação, exportação, parceiro comercial, público, privado, rotas mencionadas e estratégias.



Fonte: Informações segundo relatório gerado pelo biblioshiny

4.2 PERSPECTIVAS NA PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO

Em seu boletim informativo a IRENA (2023) aponta o custo do eletrificador como sendo ainda um gargalo a ser resolvido, aponta também uma capacidade instalada de apenas 3,5 GW de energia distribuída, mas discute que investimentos no setor, aliados a pesquisas mais efetivas, irão elevar a capacidade produtiva em números significativos, gerando uma redução dos custos de distribuição hoje.

As perspectivas são muito positivas embora encontrem desafios substanciais ao longo da discussão, como os impactos causados em populações do sul global pela extração mineral para buscar uma transição de baixo carbono (MATANZIMA et al., 2024), e as alterações provocadas em povos

dependentes sócio ecologicamente de extrativismo (TUNN et al., 2024), dentre outros pontos que necessitam de maior aprofundamento científico e tecnológico.

4.3 IMPULSIONAMENTO DO HIDROGÊNIO VERDE NO MUNDO

Os programas de descarbonização em indústrias, impulsionadas por pressões para reduzir as emissões de gases de efeito estufa (Vogl et al, 2020), só serão plenamente viáveis com o surgimento de uma nova configuração de mercado para o investimento em produtos industriais verdes. Entre as diversas ferramentas disponíveis, os Acordos Antecipados de Compras (AAC) e os Contratos por Diferença (CpD) destacam-se como mecanismos fundamentais para fomentar o desenvolvimento do hidrogênio verde globalmente.

Os AAC's garantem a compra futura de produtos em desenvolvimento, incentivando tecnologias emergentes de baixo carbono, enquanto os CpD's compensam a diferença entre o preço combinado e o preço de mercado, assegurando uma garantia de preço para fabricantes. Ambas as ferramentas, geralmente subsidiadas por entidades governamentais, são essenciais para estimular a redução das emissões de carbono.

Dentre os programas que usam desses acordos pode-se citar iniciativas ativas, como a implementação de políticas na França para investimento de €4 bilhões na produção de hidrogênio de baixo carbono (Carbon Contracts for Difference program), além de propostas como a dos EUA de fornecer US\$ 1 bilhão para vários mecanismos de demanda a produtores de hidrogênio, incluindo pagamento por entrega (DOE-OCED Regional Clean Hydrogen Hubs) e da UE para a produção de hidrogênio verde como combustível em várias indústrias, abrangendo indústrias pesadas como de aço e cimento (REpowerEU Plan).

O World Resources Institute (GANGOTRA et. al, 2023) em um artigo sobre o tema detalha de forma clara as principais soluções para contornar os gargalos na implementação desses contratos, sejam através da promoção de consultas entre as partes interessadas, buscando estabelecer acordos de preços claros e garantir previsibilidade orçamentária e de cronogramas, ou em adotar relatórios e padrões regulatórios, lançar plataformas que conectem interesses de compradores e vendedores, e o desenvolvimento de programas-piloto. Acima de tudo, é preciso aprender com as experiências anteriores, não só em outros setores e governos, mas também no próprio projeto, para não insistir em erros que possam comprometer a eficácia dessas políticas.

5 DISCUSSÕES

As informações principais contidas na Figura 1 apontam o interesse despertado pelo tema de hidrogênio verde como fonte de pesquisa, há um bom número de citações internacionais, um crescimento anual de busca pelo tema na ordem de 128% ao ano, com uma média de idade por documentos investigados pelo Bibliometrix de 1,64 anos. As Tabelas 2 e 3 apresentam respectivamente estudos publicados de 2019 a 2025 e os principais periódicos com suas respectivas publicações abordando principalmente energia renovável, produção energética, energia e conservação.

Uma tendência que se segue nas Figuras 2 e 3 quando são apresentadas a nuvem de palavras dos autores mais utilizadas e os clusters formados a partir destas palavras como demonstrado na Figura 4 onde os clusters formados apontam para descarbonização, eletrólise química, produção de hidrogênio, carbono e hidrogênio.

A cooperação internacional é bem demonstrada nas Figuras 5 e 6, sendo relevante para pesquisadores e afiliações destes, muito embora esta análise estatística não apresentou verificações de custos de produção, custos de distribuição, rendimento de produção e potencial de descarbonização que é também assunto de baixa abordagem verificada através dos dados selecionados neste estudo.

Esta lacuna a análise bibliométrica deixou em aberto, apesar de o relatório gerado pelo biblioshiny ser vasto em informações tais como: o impacto das publicações em âmbito nacional e internacional, a nuvem de palavras chave utilizadas, o mapa temático, os clusters primários e secundários gerados que aumentariam em muito a quantidade de informações neste estudo, mesmo assim entende-se ao final que estudos posteriores necessitam ser realizados para complementar estas respostas que ficam em aberto. Assim como também foi deixado em aberto pela análise bibliométrica dos artigos selecionados para este estudo o custo ambiental de implementação da produção de hidrogênio verde em função do seu alto consumo energético pelos multi eletrolisadores, muito embora em análise complementar observou-se que já existe uma movimentação entre pesquisadores para buscar alternativas de alimentação dos eletrolisadores com alternância eólica e fotovoltaica para estabilizar a corrente de alimentação dos equipamentos e estudos preditivos matemáticos também com esta finalidade.

Análise complementar, com pesquisa realizada e detalhada anteriormente na metodologia, mostrou uma perspectiva global mais aprimorada a nível de produção e distribuição, inclusive com uma rede bem estruturada através dos acordos antecipados de compra e os contratos por diferença que são mecanismos compensatórios já existentes no mercado, mostrando que o mercado energético está paralelamente à pesquisa científica impulsionando a produção a nível global do combustível.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise bibliométrica dos estudos aqui levantados e organizados por intermédio do pacote de dados bibliometrix e seu ambiente gráfico biblioshiny conseguiram traçar pontos importantes no andamento atual da pesquisa científica sobre este tema atual e relevante do ponto de vista socioeconômico.

Apesar de não ser uma proposta energética totalmente desconhecida, a alternativa do hidrogênio verde como fonte energética de provável substituição à matriz existente é atual, necessária e tem contanto com pesquisas ao longo do planeta para sua viabilização efetiva. Sua consolidação não se apresenta como anseio e sim como necessidade, muito embora gargalos e lacunas como precificação, distribuição, comercialização ainda necessita ser respondidas pelos gestores, investidores e pesquisadores.

Os custos tecnológicos são altos, os custos ambientais também necessitam ser melhor investigados, analisados e aprimorados. É notório que a tecnologia empregada na produção irá implementar um novo marco no fornecimento energético e ambiental com sua perspectiva de descarbonização.

REFERÊNCIAS

- ABDIN, Z. et al. Hydrogen as an energy vector. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 120, p. 109620, mar. 2020.
- ABED, T. K. et al. Radon gas emission from home appliances: Understanding sources, implications, and mitigation strategies. *Results in Engineering*, v. 22, p. 102133, jun. 2024.
- ADEDOYIN, F. F. et al. The implications of renewable and non-renewable energy generating in Sub-Saharan Africa: The role of economic policy uncertainties. *Energy Policy*, v. 150, p. 112115, mar. 2021.
- AHMAD, A. et al. Synergic impact of renewable resources and advanced technologies for green hydrogen production: Trends and perspectives. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 67, p. 788–806, maio 2024.
- BAKER, H. K. et al. International review of financial analysis: A retrospective evaluation between 1992 and 2020. *International Review of Financial Analysis*, v. 78, p. 101946, nov. 2021.
- DONG, J. et al. High-efficiency conversion of corn bran to ethanol at 150 L scale. *Bioresource Technology*, v. 408, p. 131216, set. 2024.
- GHASABAN, M.; YEGANEH, M.; IRANI, M. Optimizing daylight, sky view and energy production in semi-transparent photovoltaic facades of office buildings: A comparative study in four climate zones. *Applied Energy*, v. 377, p. 124707, jan. 2025.
- GODE, P. R.; ASPELUND, A. Addressing Heterogeneity in the Development of Circular Economy Strategies in the Offshore Wind Industry: A Review. *Heliyon*, p. e39577, out. 2024.
- GANGOTRA, A., Carlsen, W., Kennedy, K., & Lebling, K., 2023. How Advance Market Commitments and Contracts for Difference Can Help Create a Market for Green Industrial Products.
- GUIMARÃES, A. J. R.; BEZERRA, C. A. Gestão de dados: uma abordagem bibliométrica. *Perspectivas em Ciência da Informação*, v. 24, n. 4, p. 171–186, dez. 2019.
- GOSHAYESHI, B. et al. Selective catalytic conversion of model olefin and diolefin compounds of waste plastic pyrolysis oil: Insights for light olefin production and coke minimization. *Chemical Engineering Journal*, v. 500, p. 156987, nov. 2024.
- GUO, J.; ALI, S.; XU, M. Recycling is not enough to make the world a greener place: Prospects for the circular economy. *Green Carbon*, v. 1, n. 2, p. 150–153, dez. 2023.
- GU, A. et al. Progression of Authorship of Scientific Articles in The Journal of Hand Surgery , 1985–2015. *The Journal of Hand Surgery*, v. 42, n. 4, p. 291.e1-291.e6, abr. 2017.
- HACKMAN, L.; MACK, P.; MÉNARD, H. Behind every good research there are data. What are they and their importance to forensic science. *Forensic Science International: Synergy*, v. 8, p. 100456, 2024.

HANIF, I.; AZIZ, B.; CHAUDHRY, I. S. Carbon emissions across the spectrum of renewable and nonrenewable energy use in developing economies of Asia. *Renewable Energy*, v. 143, p. 586–595, dez. 2019

HASSAN, S. C.; KUMAR, S. Safe Green Hydrogen. In: [s.l: s.n.]. p. 143–153.

HINTZEN, R. E. et al. Relationship between conservation biology and ecology shown through machine reading of 32,000 articles. *Conservation Biology*, v. 34, n. 3, p. 721–732, 10 jun. 2020.

HERNANDEZ, A. et al. Abatement cost curve analysis of freight rail decarbonization alternatives. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, v. 134, p. 104341, set. 2024.

HERRANDO, M. et al. A review of solar hybrid photovoltaic-thermal (PV-T) collectors and systems. *Progress in Energy and Combustion Science*, v. 97, p. 101072, jul. 2023.

HÜNER, B. Mathematical modeling of an integrated photovoltaic-assisted PEM water electrolyzer system for hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 79, p. 594–608, ago. 2024.

KHOSRAVITABAR, F.; SPETEA, C. Evaluating technical parameters for microalgae immobilization to optimize green hydrogen photoproduction: A comparative review. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 67, p. 925–932, maio 2024.

KONG, X. et al. How does collaboration affect researchers' positions in co-authorship networks? *Journal of Informetrics*, v. 13, n. 3, p. 887–900, ago. 2019.

KUANG, T. et al. Optimization of user-side electrolytic hydrogen production system considering electrolyzer efficiency degradation. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 88, p. 545–556, out. 2024.

KUMAR, A. et al. A simultaneous depolymerization and hydrodeoxygenation process to produce lignin-based jet fuel in continuous flow reactor. *Fuel Processing Technology*, v. 263, p. 108129, nov. 2024.

MATANZIMA, J.; LOGINOVA, J. Sociocultural risks of resource extraction for the low-carbon energy transition: Evidence from the Global South. *The Extractive Industries and Society*, v. 18, p. 101478, jun. 2024.

MAHMUD, M. S. et al. Approximate Clustering Ensemble Method for Big Data. *IEEE Transactions on Big Data*, v. 9, n. 4, p. 1142–1155, 1 ago. 2023.

QAMRUZZAMAN, M.; JIANGUO, W. The asymmetric relationship between financial development, trade openness, foreign capital flows, and renewable energy consumption: Fresh evidence from panel NARDL investigation. *Renewable Energy*, v. 159, p. 827–842, out. 2020.

QI, R. et al. Thermal modeling and controller design of an alkaline electrolysis system under dynamic operating conditions. *Applied Energy*, v. 332, p. 120551, fev. 2023.

RAHMAN, M. M.; ANTONINI, G.; PEARCE, J. M. Open-source DC-DC converter enabling direct integration of solar photovoltaics with anion exchange membrane electrolyzer for green hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 88, p. 333–343, out. 2024.

RIBEIRO, H. C. M. Analisando a colaboração e produção científica da área ensino e pesquisa em Administração e Contabilidade. *Perspectivas em Ciência da Informação*, v. 25, n. 2, p. 194–222, jun. 2020.

SALMANI MARASHT, M. R.; JAZAYERI, S. A.; EBRAHIMI, M. Detailed analysis of a pure hydrogen-fueled dual-fuel engine in terms of performance and greenhouse gas emissions. *Alexandria Engineering Journal*, v. 109, p. 250–261, dez. 2024.

SHAO, H. Agricultural greenhouse gas emissions, fertilizer consumption, and technological innovation: A comprehensive quantile analysis. *Science of The Total Environment*, v. 926, p. 171979, maio 2024.

SHANG, Y. et al. Impacts of renewable energy on climate risk: A global perspective for energy transition in a climate adaptation framework. *Applied Energy*, v. 362, p. 122994, maio 2024.

TAOUAHRIA, B. Predicting citizens municipal solid waste recycling intentions in Morocco: The role of community engagement. *Waste Management Bulletin*, v. 2, n. 1, p. 316–326, abr. 2024.

TUNN, J. et al. Green hydrogen transitions deepen socioecological risks and extractivist patterns: evidence from 28 prospective exporting countries in the Global South. *Energy Research & Social Science*, v. 117, p. 103731, nov. 2024.

USMAN, M.; BALSALOBRE-LORENTE, D. Environmental concern in the era of industrialization: Can financial development, renewable energy and natural resources alleviate some load? *Energy Policy*, v. 162, p. 112780, mar. 2022.

VANHALA, M. et al. The usage of large data sets in online consumer behaviour: A bibliometric and computational text-mining–driven analysis of previous research. *Journal of Business Research*, v. 106, p. 46–59, jan. 2020.

VOGL, V., Åhman, M., & Nilsson, L., 2020. The making of green steel in the EU: a policy evaluation for the early commercialization phase. *Climate Policy*, 21, pp. 78 - 92. <https://doi.org/10.1080/14693062.2020.1803040>.

WANG, X. et al. Optimization of hydrogen production in multi-Electrolyzer systems: A novel control strategy for enhanced renewable energy utilization and Electrolyzer lifespan. *Applied Energy*, v. 376, p. 124299, dez. 2024.

YANG, S. et al. Research progress and frontier of global solid waste management based on bibliometrics. *Environmental Development*, v. 48, p. 100922, dez. 2023.

ZHOU, K.; LI, J. Impact of the comprehensive agricultural water use reform policy on food production: Quasinatural experimental evidence from China. *Agricultural Water Management*, v. 302, p. 108981, set. 2024.