

JOSÉ CLÁUDIO TRINDADE SIMÕES

**ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA E ROADMAP TECNOLÓGICO PARA A PRODUÇÃO DE
HIDROGÊNIO VERDE A PARTIR DE FONTES RENOVÁVEIS: UMA PERSPECTIVA DA
SIMBIOSE INDUSTRIAL**

Uberlândia MG
2025

JOSÉ CLÁUDIO TRINDADE SIMÕES

**ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA E ROADMAP TECNOLÓGICO PARA A PRODUÇÃO DE
HIDROGÊNIO VERDE A PARTIR DE FONTES RENOVÁVEIS: UMA PERSPECTIVA DA
SIMBIOSE INDUSTRIAL**

Dissertação apresentada ao Programa de
Pós-Graduação em Biocombustíveis da
Universidade Federal de Uberlândia, como
requisito para obtenção do título de Mestre
em ciência e tecnologia de Biocombustíveis.

Linha de Pesquisa: Ambiente e
Sustentabilidade

Orientador: Prof. Dr. Silvio Vaz Júnior

Uberlândia MG
2025

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

S611 Simões, José Cláudio Trindade, 1996-
2025 ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA E ROADMAP TECNOLÓGICO PARA A
PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO VERDE A PARTIR DE FONTES
RENOVÁVEIS: UMA PERSPECTIVA DA SIMBIOSE INDUSTRIAL
[recurso eletrônico] / José Cláudio Trindade Simões. - 2025.

Orientador: Silvio Vaz Junior .
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia,
Pós-graduação em Biocombustíveis.
Modo de acesso: Internet.
DOI <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2025.560>
Inclui bibliografia.
Inclui ilustrações.

1. Biocombustível. I., Silvio Vaz Junior, 1976-, (Orient.). II.
Universidade Federal de Uberlândia. Pós-graduação em
Biocombustíveis. III. Título.

CDU: 662.756

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:

Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091

Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Biocombustíveis
Av. João Naves de Ávila, 2121 - Bairro Santa Mônica, Uberlândia-MG, CEP 38400-902
Telefone: (34) 3239-4385 / 4208 - www.iq.ufu.br - ppbic@iq.ufu.br



ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Biocombustíveis			
Defesa de:	Dissertação de Mestrado Acadêmico, 053, PPBGBIOPCOM			
Data:	04 de julho de 2025	Hora de início:	14:00	Hora de encerramento:
Matrícula do Discente:	12322PGB003			
Nome do Discente:	José Cláudio Trindade Simões			
Título do Trabalho:	Análise Bibliométrica e Roadmap Tecnológico Para A Produção De Hidrogênio Verde A Partir De Fontes Renováveis: Uma Perspectiva Da Simbiose Industrial			
Área de concentração:	Biocombustíveis			
Linha de pesquisa:	Ambiente e Sustentabilidade			
Projeto de Pesquisa de vinculação:	Desenvolvimento de Moléculas Verdes da Biomassa Lignocelulósica para Química Renovável (Projeto GreenMol; processo CNPq no 400120/2019-4)			

Reuniu-se em ambiente virtual com link <https://meet.google.com/qhy-mjej-avm>, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Biocombustíveis, assim composta pelos Professores Doutores: José Dilcio Rocha, da EMBRAPA; Aline Paranhos, da Universidade Federal de Ouro Preto; e Sílvio Vaz Júnior, orientador(a) do(a) candidato(a).

Iniciando os trabalhos o(a) presidente da mesa, Dr(a). Sílvio Vaz Júnior, apresentou a Comissão Examinadora e o(a) candidato(a), agradeceu a presença do público, e concedeu ao Discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir o senhor(a) presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos(as) examinadores(as), que passaram a arguir o(a) candidato(a). Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o(a) candidato(a):

Aprovado(a).

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Sílvio Vaz Júnior, Usuário Externo**, em 09/07/2025, às 14:22, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Aline Gomes de Oliveira Paranhos, Usuário Externo**, em 14/07/2025, às 10:55, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **José Dilcio Rocha, Usuário Externo**, em 21/07/2025, às 11:30, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site
[https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?
acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0](https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **6455845** e o código CRC **8526876F**.

Referência: Processo nº 23117.043430/2025-71

SEI nº 6455845

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Cláudio Simões e Silvia Cléia por nunca medirem esforços para oferecer o melhor para mim.

As minhas irmãs Cleidine e Ana Cláudia, que sempre estão comigo.

A minha Família, em especial, minha esposa Ândria e filha Manuela pelo companheirismo e apoio diante de todas as dificuldades.

Aos meus amigos de longa data, Gabriel Moura, Ana Paula, Adriano Gama por toda amizade e apoio durante nossa jornada acadêmica que vem me ajudado desde então.

Ao professor e orientador Silvio Vaz Júnior pelas orientações e por compartilhar seu conhecimento comigo, além de toda paciência e auxílio possível durante essa jornada acadêmica.

RESUMO

A crescente dependência de combustíveis fósseis intensificou a emissão de gases de efeito estufa (GEE), agravando os impactos ambientais e impulsionando a busca por soluções energéticas sustentáveis. Nesse contexto, o hidrogênio verde (HV), produzido a partir de fontes renováveis, destacou-se como uma alternativa promissora para a descarbonização de setores industriais e de transporte. No entanto, sua implementação em larga escala ainda enfrentou barreiras técnicas, econômicas e estruturais. A simbiose industrial (SI) surgiu como uma abordagem estratégica para enfrentar parte desses desafios, ao viabilizar o aproveitamento de resíduos, a integração entre processos produtivos e a otimização de recursos energéticos. Este estudo teve como objetivo realizar uma análise bibliométrica sobre a convergência entre SI e a produção de HV, complementada pela elaboração de um *roadmap* tecnológico que apontasse direções estratégicas para o desenvolvimento dessa cadeia produtiva com base em fontes sustentáveis. A metodologia adotada consistiu na revisão de publicações científicas indexadas na base de dados Scopus, com aplicação de critérios de seleção para garantir a relevância e atualidade dos documentos analisados. Foram examinados indicadores como o número de publicações ao longo do tempo, redes de coautoria, distribuição geográfica dos autores e frequência de palavras-chave. Os resultados evidenciaram um crescimento progressivo do interesse acadêmico pela temática, embora as interações diretas entre HV e SI ainda se encontrassem em estágio inicial. A China liderou a produção científica no período analisado, seguida por países europeus e pela Índia, refletindo o envolvimento global na busca por soluções energéticas limpas e inovadoras. A segunda etapa do trabalho consistiu na construção de um *roadmap* tecnológico voltado à produção de HV com foco na aplicação de SI. Esse instrumento permitiu mapear desafios tecnológicos, identificar oportunidades de inovação e delinear possíveis sinergias entre setores industriais, considerando diferentes horizontes temporais de curto, médio e longo prazos. A abordagem contribuiu para a definição de caminhos estratégicos orientados à implementação industrial do HV de maneira eficiente e ambientalmente responsável. A integração entre os achados bibliométricos e o *roadmap* tecnológico reforçou a importância de políticas públicas estruturadas, investimentos direcionados e parcerias intersetoriais para acelerar a consolidação do HV como vetor energético. Os resultados também destacaram a necessidade de fomentar redes colaborativas de pesquisa e abordagens interdisciplinares, capazes de ampliar a maturidade tecnológica e operacional da área.

Palavras-chave: gases de efeito estufa; integração de processos; transição energética; inovação sustentável; economia circular.

ABSTRACT:

The growing dependence on fossil fuels has intensified greenhouse gas (GHG) emissions, exacerbating environmental impacts and driving the search for sustainable energy solutions. In this context, green hydrogen (GH), produced from renewable sources, has emerged as a promising alternative for the decarbonization of industrial and transportation sectors. However, its large-scale implementation still faces technical, economic, and structural barriers. Industrial symbiosis (IS) has emerged as a strategic approach to address some of these challenges by enabling waste utilization, integration between production processes, and optimization of energy resources. This study aimed to conduct a bibliometric analysis of the convergence between IS and GH production, complemented by the development of a technological roadmap indicating strategic directions for the development of this production chain based on sustainable sources. The methodology involved a review of scientific publications indexed in the Scopus database, applying selection criteria to ensure the relevance and timeliness of the analyzed documents. Indicators such as the number of publications over time, co-authorship networks, geographical distribution of authors, and frequency of keywords were examined. The results revealed a steady growth in academic interest in the subject, although direct interactions between GH and IS remain in their early stages. China led scientific production during the analyzed period, followed by European countries and India, reflecting global engagement in the pursuit of clean and innovative energy solutions. The second stage of the study involved the construction of a technological roadmap focused on GH production with an emphasis on IS applications. This tool made it possible to map technological challenges, identify innovation opportunities, and outline potential synergies among industrial sectors, considering different time horizons: short, medium, and long term. This approach contributed to the definition of strategic pathways aimed at the efficient and environmentally responsible industrial implementation of GH. The integration of bibliometric findings with the technological roadmap reinforced the importance of structured public policies, targeted investments, and cross-sector partnerships to accelerate the consolidation of GH as an energy vector. The results also highlighted the need to foster collaborative research networks and interdisciplinary approaches capable of enhancing the technological and operational maturity of the field.

Keywords: greenhouse gases; process integration; energy transition; sustainable innovation; circular economy.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Classificação de cores do hidrogênio.....	9
Figura 2. Modelo de <i>roadmap</i>	21
Figura 3. Organização metodológica do roadmap tecnológico.....	22
Figura 4. Exemplo do layout utilizado para construção do <i>roadmap</i> e suas características.....	31
Figura 5. Relação de crescimento por ano em relação aos temas SI e HV abril de 2024	34
Figura 6. Percentual de pesquisa dos temas SI e HV por área.....	35
Figura 7. Rede de colaboração entre autores.....	47
Figura 8. Rede de colaboração entre países.....	51
Figura 9. Rede de coocorrência de palavras-chave.....	54
Figura 10. Rede de colaboração de periódicos.....	57
Figura 11. Número de patentes por país.....	61
Figura 12. Número de patentes depositadas e patentes concedidas por país.....	62
Figura 13. Distribuição das patentes por Empresas x universidades.....	64
Figura 14. Distribuição dos artigos relacionados a construção do roadmap por país.	68
Figura 15. Periódicos com maior número de artigos relacionados a construção do roadmap tecnológico.	70
Figura 16. Roadmap tecnológico para o estágio atual.....	76
Figura 17. Roadmap tecnológico para o horizonte de curto prazo.....	79
Figura 18. Roadmap tecnológico para o horizonte de médio prazo.....	82
Figura 19. Roadmap tecnológico para o horizonte de longo prazo.....	85

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resultado refinado das combinações	27
Tabela 2 - Combinações utilizadas para etapa de busca do roadmap	30
Tabela 3 - Resultado de busca das combinações 1,2 e 3 apresentando o resultado geral e com o refinamento.....	32
Tabela 4 - Principais autores relacionados ao SI combinado com HV	36
Tabela 5 - Principais países relacionados ao tema SI e HV	39
Tabela 6 - Relação das palavras-chave com maior frequência	41
Tabela 7 - Número de artigos, citações e fator de impacto dos principais periódicos com base no resultado da pesquisa das palavras-chave.....	44
Tabela 8 – Panorama de patentes em tecnologias de hidrogênio: Distribuição por tipo de Instituição, País e status da proteção.....	65
Tabela 9 - Taxonomias definidas com base nas análises meso e análise micro	72
Tabela 10 - Classificação do nível de maturidade tecnológica (TRL) das tecnologias apresentadas em cada período de tempo do roadmap tecnológico	88

LISTA DE ABREVIATURAS

- ACB – Análise de Custo-Benefício
ACV – Análise de Ciclo de Vida
CCUS – *Carbon, Capture, Use and Storage*
EC – Economia Circular
EI – Ecologia Industrial
GH – Green Hydrogen (Hidrogênio Verde)
GEE – Gases de Efeito Estufa
HV – Hidrogênio Verde
P,Del – Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação
PI – Parque Industrial
RMES – *Renewable Multi-Energy Systems*
SI – Simbiose Industrial
SMR – Steam Methane reforming
TRL – *Technology Readiness Level*
VPL – Valor Presente Líquido
BESS – *Battery Energy Storage System*
FID - Final Investment Decision

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Tema e problema da pesquisa	3
1.2. Objetivo geral.....	3
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1. Economia circular.....	4
2.2. Simbiose industrial.....	5
2.3. Geração de hidrogênio.....	7
2.3.1. Categorias de hidrogênio	9
2.3.2. Hidrogênio verde	11
2.3.3. Produção de hidrogênio verde a partir da energia eólica	14
2.3.4. Produção de hidrogênio verde a partir de energia solar	14
2.3.5. Produção de hidrogênio verde a partir de hidrelétricas	15
2.3.6. Produção de hidrogênio verde a partir do biogás	16
2.4. A relação entre a simbiose industrial e o hidrogênio verde	17
2.5. <i>Roadmap</i> tecnológico	20
3. METODOLOGIA.....	23
3.1. Análise bibliométrica	25
3.1.1. Dados bibliométricos	26
3.2. <i>Roadmap</i> tecnológico	29
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	32
4.1. Análise de desempenho.....	32
4.1.1. Desempenho dos autores	36
4.1.2. Desempenho por país	39
4.1.3. Desempenho das palavras-chave	41
4.1.4. Desempenho por periódico	43
4.2. Análise de rede	46
4.3. Elaboração do <i>roadmap</i> tecnológico.....	59
4.3.1. Análise do resultado das patentes.....	60
4.3.2. Análise do resultado dos artigos	67
4.3.3. Desenvolvimento do eixo vertical (Análise Meso e Micro).....	71
4.3.4. Construção do <i>roadmap</i> tecnológico	75
4.3.4.1. Estágio Atual	75

4.3.4.2. Curto Prazo	78
4.3.4.3. Médio Prazo	81
4.3.4.4. Longo Prazo	84
5. CONCLUSÕES	90
6. PERSPECTIVAS FUTURAS	92
6.1. Proposta de produção de hidrogênio verde via simbiose industrial no Brasil 93	
7. REFERÊNCIAS	94
8. ANEXOS.....	113

1. INTRODUÇÃO

Os avanços tecnológicos impulsionaram o crescimento das atividades industriais em escala global, resultando em um aumento proporcional no consumo de recursos naturais e na demanda por energia para alimentar processos de produção, maquinário e infraestrutura (Marinelli et al., 2020). O modelo econômico que sustenta essa estrutura de consumo é linear e unidirecional, caracterizado pela sequência de extração, produção, uso e descarte. Tal modelo revela-se incompatível com uma lógica sustentável de fluxo de materiais e energia, especialmente devido ao uso intensivo de recursos naturais e à consequente degradação ambiental provocada pela geração de resíduos e emissões de gases de efeito estufa (GEE) (Castlet-Viciano et al., 2022).

Para mitigar esses efeitos negativos, abordagens alternativas vêm sendo desenvolvidas, com destaque para a economia circular (EC), uma estrutura conceitual voltada à minimização dos impactos ambientais por meio do reaproveitamento de recursos, da regeneração sistêmica e da reinserção de resíduos nas cadeias produtivas (Korhonen et al., 2018). Um dos pilares da EC é a ecologia industrial (EI), que promove a organização de fluxos de matéria e energia de maneira integrada entre diferentes setores industriais. Dentro desse contexto, a simbiose industrial (SI) configura-se como uma estratégia central, ao fomentar colaborações entre empresas, facilitando a troca de subprodutos e a utilização compartilhada de recursos com o objetivo de aumentar a eficiência e reduzir emissões (Daquin et al., 2023; Baldassarre et al., 2019). Essa abordagem tem se mostrado eficaz no desenvolvimento de sistemas ecoindustriais, com destaque para o papel da engenharia de sistemas na projeção de fluxos interindustriais otimizados (Dou et al., 2021).

Além da SI, outras estratégias vêm sendo implementadas para apoiar a sustentabilidade industrial e energética. Entre elas, destaca-se a produção de HV, uma alternativa promissora na transição energética global. De acordo com Pein et al. (2021), o HV representa uma opção limpa de geração de energia por ser produzido a partir da eletrólise da água utilizando energia elétrica a partir de fontes renováveis, como solar, eólica e hidrelétrica. Isso permite não apenas reduzir as emissões de GEE, mas também estabelecer um modelo energético mais sustentável e resiliente.

Apesar dos avanços recentes, a produção global de hidrogênio segue amplamente dependente de fontes fósseis. Segundo o *Global Hydrogen Review 2024*, cerca de 97 milhões de toneladas (Mt) foram produzidas em 2023, das quais menos de 1 Mt corresponderam a hidrogênio de baixas emissões. A maior parte ainda deriva do gás natural sem tecnologias de CCUS, seguido pelo carvão, com destaque para a China. Embora a capacidade anunciada para projetos de hidrogênio de baixas emissões possa alcançar 49 Mt/ano até 2030, a maioria ainda se encontra em estágios iniciais. A eletrólise lidera esse crescimento, com 20 GW de capacidade já em decisão final de investimento (FID, *Final Investment Decision*), impulsionada principalmente pela China, responsável por mais de 40% dessas decisões. Projetos baseados em combustíveis fósseis com CCUS também avançaram, especialmente na América do Norte e Europa, com capacidade confirmada de 1,5 Mt/ano.

Ainda com base nos dados do *Global Hydrogen Review 2024* mesmo com esse progresso, a ampliação do HV enfrenta desafios técnicos, regulatórios e de mercado, exigindo taxas de crescimento superior a 90% ao ano para cumprir as metas até 2030. A América Latina, em especial o Brasil, apresenta vantagens competitivas para a produção de HV, graças à abundância de fontes renováveis e uma matriz elétrica majoritariamente limpa. A *International Energy Agency* (IEA) projeta que a região pode produzir mais de 7 Mt/ano de hidrogênio com baixa intensidade de carbono, atendendo critérios internacionais de sustentabilidade. Segundo IPEA (2022) o Brasil, com seus recursos naturais, tem potencial para se tornar um exportador estratégico de HV, especialmente em derivados como a amônia. No entanto, esse cenário depende de investimentos em infraestrutura e geração elétrica, além de políticas públicas coordenadas e parcerias internacionais que garantam a viabilidade econômica e ambiental dessa rota tecnológica.

Embora haja um interesse crescente nas áreas de SI e HV a integração entre esses dois campos ainda é limitada e pouco explorada na literatura científica. Quando analisados separadamente, ambos apresentam avanços significativos, mas é na sua articulação que surgem oportunidades promissoras e também desafios relevantes. Por um lado, a aplicação da SI pode favorecer a produção de HV ao promover o aproveitamento de subprodutos e a integração de processos, contribuindo para ganhos de eficiência, redução de custos e minimização de impactos ambientais. Por outro lado, essa integração exige alinhamento entre setores produtivos, infraestrutura

adequada e políticas públicas articuladas, o que pode representar barreiras técnicas e institucionais.

Nesse contexto, o uso de um *roadmap* tecnológico mostra-se como uma ferramenta estratégica para apoiar o planejamento e a tomada de decisão, permitindo visualizar cenários futuros, identificar sinergias e orientar ações de desenvolvimento em médio e longo prazo. Ao consolidar informações dispersas e alinhar diferentes atores em torno de objetivos comuns, o *roadmap* contribui para reduzir incertezas e promover a inovação de forma estruturada e coordenada (Phaal, Farrukh e Probert, 2004).

1.1. Tema e problema da pesquisa

Apesar do crescente interesse científico e tecnológico por soluções de baixo carbono, a produção de HV ainda enfrenta entraves técnicos, econômicos e logísticos que dificultam sua aplicação em escala industrial. Ao mesmo tempo, a SI se apresenta como uma estratégia promissora para maximizar a eficiência de processos produtivos sustentáveis. No entanto, observa-se uma escassez de estudos que explorem a sinergia entre essas duas abordagens. Diante disso, questiona-se: de que maneira a SI pode contribuir para viabilizar a produção de HV a partir de fontes renováveis, e quais são os caminhos tecnológicos e estratégicos para sua implementação efetiva?

1.2. Objetivo geral

Realizar uma análise bibliométrica e desenvolver um *roadmap* tecnológico que possibilite explorar a interseção entre a SI e a produção de HV a partir de fontes renováveis, com o objetivo de identificar tendências, lacunas e oportunidades para a implementação estratégica dessa integração no contexto da transição energética sustentável.

1.1. Objetivos específicos

- Mapear e analisar a produção científica relacionada à SI e à produção de HV, com base em dados biométricos.
- Identificar e analisar os principais autores, instituições, palavras-chave, redes de colaboração e regiões geográficas que lideram as pesquisas nessa temática.
- Elaborar um *roadmap* tecnológico que proponha direções estratégicas para a integração entre SI e produção de HV, considerando aspectos técnicos, econômicos e ambientais relevantes à sua implementação em escala industrial.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Economia circular

O reaproveitamento de resíduos e sua máxima otimização são elementos centrais no comprometimento das indústrias com um ambiente mais sustentável. Um fluxo projetado para gerar valor a partir de resíduos deve enfatizar o desenvolvimento de ideias que promovam o uso de resíduos em outras atividades, contribuindo para a redução de emissões de poluentes e minimizando o descarte de produtos e materiais no meio ambiente. Essas características moldam o conceito de Economia Circular (EC), que busca repensar o ciclo produtivo de modo a tornar os processos mais eficientes e menos dependentes de recursos virgens (Korhonen et al., 2018).

A EC é caracterizada como uma abordagem inovadora para a gestão de recursos, com foco na minimização do desperdício, na redução do uso de matérias-primas e na promoção da reutilização e reciclagem de produtos e materiais. Reconhecida por contribuir tanto para a mitigação de impactos ambientais quanto para a geração de valor econômico sustentável, a EC propõe a reestruturação dos sistemas produtivos com base nos princípios da circularidade. Para que essa transição seja viável em contextos industriais reais e complexos, torna-se necessário o uso de instrumentos metodológicos e operacionais que apoiem sua implementação prática (Ghisellini et al., 2016).

Nesse sentido, a EI se insere como uma disciplina fundamental, fornecendo os fundamentos teóricos e as ferramentas analíticas necessárias para transformar os

princípios da EC em práticas concretas. Ela propõe a reorganização dos sistemas industriais inspirando-se nos ecossistemas naturais, onde os resíduos de uma atividade se tornam recursos para outra, promovendo ciclos fechados de materiais e energia (Zhou et al., 2024). A partir da análise de fluxos entre processos, cadeias produtivas e territórios, a EI permite visualizar interdependências, identificar sinergias e redesenhar modelos de produção com menor impacto ambiental. Assim, ela atua como um elo entre a teoria circular e suas estratégias de implementação, preparando o terreno para arranjos industriais mais integrados e colaborativos (Davis, Nikolic e Dijkema, 2010).

Dentro desse escopo técnico e conceitual, a SI destaca-se como uma aplicação prática direta dos princípios propostos tanto pela EC quanto pela EI. A SI envolve a cooperação entre diferentes empresas para o intercâmbio de recursos, subprodutos, energia e água, promovendo uma rede de interações que agrega valor aos resíduos e otimiza os fluxos produtivos. O objetivo fundamental da SI é criar sistemas mais eficazes, economicamente viáveis e ecologicamente responsáveis, contribuindo para a construção de um futuro baseado na sustentabilidade (Tseng et al., 2018). Ao operar em escala territorial ou setorial, a SI potencializa os benefícios ambientais e econômicos da EC, ao mesmo tempo em que consolida os princípios sistêmicos da EI.

2.2. Simbiose industrial

A SI configura-se como um modelo operacional colaborativo inserido no escopo da EC, baseado na integração estratégica de processos entre diferentes organizações. Sua essência está na troca sistemática de fluxos de materiais, energia, água, subprodutos e informações, promovendo uma gestão mais eficiente dos recursos e reduzindo os impactos ambientais. A SI transforma o resíduo de uma empresa em insumo para outra, criando cadeias produtivas interligadas e mais sustentáveis (Akyazy et al., 2023).

A estruturação dessas redes simbióticas pode variar conforme a distribuição geográfica e a natureza das atividades econômicas envolvidas. Nesse sentido, as interações podem ocorrer: (a) internamente, dentro da mesma empresa ou planta industrial; (b) em arranjos locais, entre empresas situadas em um mesmo parque

industrial; ou (c) em sistemas descentralizados, entre organizações que não compartilham o mesmo território físico, mas se conectam por meio de cadeias logísticas eficientes e plataformas digitais de gerenciamento. Essa diversidade de configurações amplia o escopo de aplicação da SI e demanda diferentes estratégias de coordenação e governança (Bourdin e Torre, 2025).

Como exemplo da aplicação prática da SI, destaca-se o caso de Kalundborg, na Dinamarca. Nesse ecossistema industrial, empresas de diferentes setores como refinarias, termelétricas e indústrias farmacêuticas compartilham recursos como vapor, água, gesso e resíduos orgânicos, estabelecendo uma rede integrada e funcional (Chertow, 2007). O sistema resultou em expressiva redução de custos, emissões e desperdícios, além de fortalecer o desenvolvimento socioeconômico local. Esse caso evidencia a importância da proximidade geográfica, da comunicação contínua entre os agentes e da institucionalização de acordos formais para o sucesso da simbiose (Jacobsen, 2006). A relevância do caso de Kalundborg segue sendo utilizado como base para estudos recentes, como o de Sun et al. (2024), que investiga a evolução dos parques industriais (PI) sob a ótica da neutralidade de carbono, e o de Bruel e Godina (2023), que explora o uso da tecnologia *blockchain* para viabilizar e tornar mais segura a implementação da SI por meio de contratos inteligentes com Hyperledger Fabric.

A expansão do conceito de SI também se beneficiou da digitalização e da adoção de tecnologias inteligentes. Plataformas digitais de gerenciamento e sistemas baseados em dados têm permitido a identificação remota de sinergias industriais, possibilitando a formação de redes simbióticas mesmo em contextos dispersos geograficamente. Esse avanço não apenas facilita a escalabilidade das iniciativas, como também aprimora a rastreabilidade dos fluxos e a eficiência nas negociações entre os atores envolvidos (Yeo et al., 2019).

A partir de 2015, com a crescente preocupação ambiental e evidências de que 62% das emissões globais de gases de efeito estufa em 2012 estavam relacionadas à produção industrial, houve um impulso global para o desenvolvimento de parques ecoindustriais e a adoção da SI como ferramenta estratégica de mitigação (Perrucci et al., 2022; Martins; Harris, 2018). Desde então, observou-se um crescimento significativo desses modelos: dos 15.000 PI existentes no mundo, cerca de 300 já são

considerados ecoindustriais, em contraste com os 50 identificados no ano 2000. Essa expansão reflete uma tendência global em direção a soluções produtivas mais sustentáveis. Além de Kalundborg referência consolidada com mais de 30 anos de desenvolvimento interindustrial Exemplos marcantes de SI estão distribuídos em diversas regiões: em Kawasaki (Japão), empresas compartilham calor, água e materiais; em Roterdã (Holanda), indústrias trocam energia e matérias-primas com apoio de universidades e governos; em Kalgoorlie (Austrália), uma integração entre usinas de energia, minas e tratamento de águas resulta em circularidade regional; em Pequim (China), políticas públicas incentivam trocas industriais sustentáveis (Ramos et al., 2024).

Além de seu papel central na mitigação das emissões, a SI se destaca como catalisadora da inovação tecnológica e da reestruturação de modelos de negócio mais sustentáveis. Mortensen e Kornov (2019) ressaltam que a adoção da SI favorece a criação de ecossistemas industriais integrados, mais resilientes e com maior eficiência econômica. Esse potencial tem atraído atenção de diversos setores produtivos, incluindo mineração, indústria química, alimentícia, energética e de manufatura, todos caracterizados por fluxos intensivos de recursos e subprodutos (Boix et al., 2015).

Dentro desse contexto, torna-se particularmente relevante explorar a convergência entre SI e outras tecnologias emergentes voltadas à sustentabilidade, em especial, a produção de HV. A sinergia entre essas duas áreas poderá representar uma alavanca decisiva para viabilizar economicamente o hidrogênio como vetor energético limpo (Zhang, Qiao e Liu, 2025) Por exemplo, a pesquisa de Savian et al. (2023) em que propõe dois modelos de otimização para aumentar simultaneamente a sustentabilidade e a resiliência em cadeias de suprimentos industriais. A combinação do uso de HV, SI e *blockchain* visa reduzir a pegada de carbono e melhorar a capacidade de resposta a eventos disruptivos.

2.3. Geração de hidrogênio

O hidrogênio é o elemento químico mais abundante do universo, representando aproximadamente 90% da massa da matéria existente. Na Terra, está amplamente distribuído em compostos como a água e os hidrocarbonetos. Trata-se de um gás incolor, inodoro, insípido e altamente inflamável, que se destaca por seu elevado

potencial energético sua densidade energética por unidade de massa é de 120,7 kJ/g, o que o qualifica como um vetor energético altamente eficiente (Xu et al., 2022).

Segundo a *Global Hydrogen Review* 2023, publicada pela Agência Internacional de Energia (IEA), a produção global de hidrogênio atingiu 95 milhões de toneladas em 2022, com um crescimento anual estimado em 3%. No entanto, cerca de 83% dessa produção ainda provém de fontes fósseis, principalmente gás natural e carvão, sem a utilização de tecnologias de CCUS. Essa predominância de métodos convencionais evidencia a necessidade urgente de uma transição para rotas de produção mais limpas e sustentáveis, em consonância com os compromissos internacionais de descarbonização (Mudarov, 2023).

Atualmente, as principais tecnologias de produção de hidrogênio incluem a reforma a vapor de metano (*Steam Methane Reforming* – SMR), a gaseificação de carvão e a eletrólise da água. Dentre essas, apenas a eletrólise, quando alimentada por fontes de energia renovável, como solar ou eólica, é capaz de gerar o chamado hidrogênio verde caracterizado pela ausência de emissões diretas de carbono. Este processo tem sido cada vez mais valorizado como um pilar estratégico na transição energética global, especialmente para aplicações em setores de difícil eletrificação, como o transporte de cargas pesadas e indústrias de base intensivas em energia (RISSMAN et al., 2020).

Dawood (2020) propõe uma categorização do hidrogênio em três classes principais: **hidrogênio cinza** (produzido a partir de combustíveis fósseis sem mitigação de emissões), **hidrogênio azul** (também proveniente de fontes fósseis, mas com aplicação de tecnologias de CCUS) e **hidrogênio verde** (gerado via eletrólise com energia renovável). Apenas esta última categoria atende integralmente aos critérios de neutralidade climática estabelecidos pelos acordos internacionais de mitigação das mudanças climáticas. Dessa forma, a classificação do hidrogênio com base em sua origem e nos níveis de emissões de GEE associados evidencia a importância de investir em tecnologias sustentáveis, que contribuam efetivamente para a redução das emissões e para o cumprimento das metas globais de descarbonização.

2.3.1. Categorias de hidrogênio

De acordo com Incer-Valverde et al. (2023), a categorização do hidrogênio está diretamente relacionada aos métodos empregados em sua produção, os quais variam conforme o tipo de processo adotado, a origem da energia utilizada e o volume de emissões de dióxido de carbono (CO_2) gerado. Essa classificação utiliza uma convenção cromática que identifica até nove categorias distintas de hidrogênio, sendo que algumas cores refletem métodos mais sustentáveis, enquanto outras indicam elevado impacto ambiental devido à significativa emissão de GEE. Entre as classificações mais recorrentes na literatura técnica destacam-se o hidrogênio cinza, marrom, azul, turquesa e verde. Na Figura 1 observa-se a classificação geral do hidrogênio.

Terminologia	Tecnologia	Matriz ou fonte de eletricidade	Pegada de GEE*
Hidrogênio Verde	Eletrólise	Solar Eólica Hydro	Mínima
Hidrogênio Roxo/Rosa	Eletrólise	Nuclear	Mínima
Hidrogênio Amarelo	Eletrólise	Energia elétrica de origem mista	Média
Hidrogênio Azul	Reforma do gás natural + CCUS Gaseificação + CCUS	Gás natural	Baixa
Hidrogênio Turquesa	Pirólise	Carvão (carvã/subproduto)	Média
Hidrogênio Cinza	Reforma do gás natural	Carvão mineral	Alta
Hidrogênio Marrom	Gaseificação	Carvão betuminoso	Alta
Hidrogênio Preto	Gaseificação	Carvão negro	Alta

Figura 1. Classificação de cores do hidrogênio. Fonte: Adaptado de Cheng e Lee (2022)

O **hidrogênio cinza** é produzido predominantemente a partir de fontes fósseis, como o gás natural, por meio da SMR (*Steam Methane Reforming*), ou da gaseificação do carvão mineral, sem a incorporação de tecnologias de captura de carbono. Essa rota produtiva possui alta pegada de carbono, o que evidencia sua contribuição

negativa para as mudanças climáticas, devido à emissão intensiva de CO₂ (Ajanovic et al., 2022).

O **hidrogênio marrom**, por sua vez, tem como principal fonte o carvão mineral e é obtido via gaseificação desse insumo. Esse processo está entre os mais poluentes, dada a elevada liberação de CO₂, o que o torna ambientalmente insustentável. A nomenclatura “marrom” simboliza a gravidade dos impactos ambientais associados a esse tipo de produção (Arcos; Santos, 2023).

O **hidrogênio azul**, embora também derivado de fontes fósseis, incorpora tecnologias de CCUS, possibilitando a mitigação parcial das emissões associadas. Dessa forma, essa categoria é considerada uma alternativa intermediária, com potencial de facilitar a transição para rotas de produção mais limpas, alinhadas a um modelo energético de baixo carbono (Ratnakar et al., 2021).

Já o **hidrogênio turquesa** é obtido por meio da pirólise do metano, um processo que gera carbono sólido ao invés de CO₂ como subproduto. Esse carbono, na forma de material filamentoso ou nanotubos, pode ser aproveitado em aplicações industriais ou comercializado, o que representa vantagens operacionais e ambientais, como a redução das emissões e a facilidade de armazenamento (Koranyi et al., 2022).

Além das rotas artificiais de produção de hidrogênio, também existe sua ocorrência natural no ambiente. Nesse sentido, ganha destaque o **hidrogênio geológico**, que não resulta de processos industriais, mas da própria dinâmica terrestre. O hidrogênio geológico é uma forma de hidrogênio natural que se forma e se acumula no subsolo por processos químicos espontâneos associados à dinâmica da Terra, destacando-se reações como a serpentínização de rochas ultramáficas em contato com água, a oxidação de minerais ferrosos e a radiólise da água causada por minerais radioativos. Ele pode ser encontrado em zonas de falha, fraturas profundas, bacias sedimentares e ambientes ricos em minerais específicos, acumulando-se de maneira semelhante ao petróleo e ao gás natural (Boretti, 2025).

A extração do hidrogênio geológico utiliza métodos inspirados na indústria de óleo e gás, com perfurações direcionadas para acessar os reservatórios subterrâneos, embora ainda existem desafios técnicos relacionados à difusão da molécula de hidrogênio e à necessidade de sistemas eficientes de captação. Atualmente, a

exploração desse recurso encontra-se em estágio inicial, com poucos projetos em operação como o caso emblemático de Bourakébougou, no Mali, onde o hidrogênio alimenta uma usina local desde 2012 e com iniciativas de prospecção em expansão em países como França, Estados Unidos, Austrália e Brasil (Sun, Zhang e Sun, 2025).

No contexto de transição energética, o HV tem se destacado por sua capacidade de ser gerado exclusivamente a partir de fontes renováveis, como energia solar, eólica ou hidrelétrica, por meio da eletrólise da água. Por não emitir CO₂ durante sua produção, o HV se configura como a alternativa mais alinhada aos princípios da sustentabilidade ambiental. Essa categoria vem ganhando protagonismo por seu potencial de eliminar emissões de GEE, promovendo sinergias positivas entre os setores industrial, acadêmico, político e social (Abad e Dodds, 2020).

A designação “verde” está atrelada a um processo produtivo que não apenas evita a emissão de carbono, mas também utiliza exclusivamente energia limpa. Essa categorização cromática, além de facilitar o entendimento técnico, permite distinguir de forma objetiva os impactos ambientais de cada rota tecnológica, favorecendo a adoção de práticas sustentáveis nas cadeias produtivas. O HV representa uma das principais estratégias para o avanço de uma economia global de baixo carbono, especialmente quando articulado com abordagens complementares como a SI, inserida no escopo da EC e da EI (Sorrenti et al., 2023).

2.3.2. Hidrogênio verde

O HV é uma estratégia de produção por meio da eletrólise da água, utilizando eletricidade gerada a partir de fontes renováveis, como a energia solar ou eólica. Esse processo confere ao HV o *status* de fonte de energia limpa e sustentável, destacando-se por seu potencial em diversas aplicações industriais que visam mitigar as emissões de carbono e reduzir a dependência de combustíveis fósseis. Um de seus principais atributos é a versatilidade, fator que impulsiona a crescente demanda global por um produto não apenas eficiente, mas também ambientalmente responsável (Nikolaidis e Poullikkas, 2017).

Nesse contexto, o HV assume um papel fundamental na transição energética, contribuindo significativamente para a construção de uma economia mais sustentável. Suas aplicações abrangem uma gama diversificada de setores, incluindo transporte,

armazenamento de energia, produção química, geração de energia elétrica, indústria e geração de calor e vapor, sua utilização nesses segmentos é vista como estratégica para o avanço de tecnologias mais limpas e para a promoção de uma economia de baixo carbono (Amin et al., 2022)

Uma perspectiva crítica para a avaliação da sustentabilidade na produção de HV é fornecida pela Análise do Ciclo de Vida (ACV), que permite examinar os impactos ambientais associados a cada estágio do processo desde a extração das matérias-primas até o descarte final do produto. Essa abordagem considera variáveis como o consumo energético, a geração de resíduos, as emissões de GEE e o uso de recursos naturais. Apesar de os biocombustíveis serem frequentemente apontados como uma solução de baixo carbono, existem preocupações sobre seus possíveis impactos ambientais não intencionais em larga escala (Patel e Singh, 2023).

De acordo com Ajeeb et al. (2024), uma ACV da produção de HV normalmente contempla quatro estágios principais: (i) produção de eletricidade renovável; (ii) eletrólise da água; (iii) armazenamento e compressão do hidrogênio; e (iv) distribuição e uso final. Cada estágio contribui de maneira significativa para o impacto ambiental global do processo, representando também pontos críticos para redução da pegada ecológica.

O primeiro estágio, a geração de eletricidade por fontes renováveis como energia solar, eólica ou hidrelétrica, é essencial para o funcionamento dos eletrolisadores. Embora essas fontes tenham impactos ambientais diretos reduzidos, a construção, manutenção e descarte de suas infraestruturas (como turbinas e painéis solares) ainda acarretam emissões e uso intensivo de recursos (Gayen et al., 2023). Para mitigar tais impactos, recomenda-se a adoção de materiais de menor impacto ambiental, maior durabilidade e eficiência na geração de energia (Hammi et al., 2024). Além disso, a integração de sistemas de energia renovável com modelos de SI pode potencializar sinergias operacionais, reduzindo ainda mais as emissões associadas (Heck et al., 2024).

A etapa de produção do hidrogênio via eletrólise é um dos pontos mais sensíveis em termos ambientais. A escolha dos materiais utilizados na fabricação de eletrolisadores como níquel, platina e aço exerce influência significativa nas categorias de impacto ambiental (Wey et al., 2024). Embora o uso de eletricidade renovável

mitigue a emissão de GEE, permanecem desafios relacionados à alta demanda energética da eletrólise e ao impacto ambiental associado à produção dos equipamentos. Avanços na eficiência dos eletrolisadores e o uso de estratégias integradas de gerenciamento energético como a sincronização entre a geração intermitente de energia renovável e a operação dos eletrolisadores são essenciais para melhorar o desempenho ambiental (Iyer et al., 2024).

O armazenamento do HV apresenta desafios específicos, principalmente relacionados ao consumo energético e à segurança da infraestrutura. O hidrogênio pode ser armazenado em estado gasoso ou líquido, sendo que ambos exigem quantidades consideráveis de energia para compressão ou resfriamento (Ge et al., 2024). Inovações tecnológicas voltadas à redução do consumo energético e à melhoria da eficiência dos sistemas de armazenamento são fundamentais para minimizar os impactos ambientais (Osmã et al., 2024).

Na etapa final da cadeia, a distribuição e o uso do hidrogênio também implicam desafios ambientais. O transporte em longas distâncias demanda energia adicional, seja para compressão, liquefação ou transporte por dutos. O impacto ambiental dessa fase depende da eficiência das tecnologias empregadas para a conversão energética (como células a combustível ou sistemas de combustão) e das aplicações finais do hidrogênio (Maniscalco et al., 2024). Assim, a adoção de tecnologias eficientes e a otimização das redes logísticas são determinantes para reduzir as perdas e emissões. Adicionalmente, a incorporação do HV em modelos de EC com ênfase na reutilização e reciclagem do recurso contribui para a minimização de resíduos e emissões (Vaz et al., 2022).

Atualmente, a produção global de hidrogênio é amplamente dominada por processos convencionais que extraem o gás de fontes fósseis, como a gaseificação, a reforma a vapor e a pirólise. Contudo, essas tecnologias, apesar de consolidarem a produção em larga escala, não são adequadas ao paradigma de sustentabilidade, pois dependem de combustíveis fósseis, o que resulta em altas emissões de CO₂. A necessidade de transitar para processos baseados em fontes de energia renováveis é imperativa para a produção de hidrogênio sem a geração de emissões de CO₂, especialmente em um cenário de crescente preocupação com as mudanças climáticas e os impactos decorrentes das emissões de GEE (Goren et al., 2023).

2.3.3. Produção de hidrogênio verde a partir da energia eólica

A produção de HV a partir da energia eólica envolve a conversão da energia cinética do vento em eletricidade por meio de turbinas eólicas, que utilizam um gerador para capturar essa energia. A eletricidade gerada pelas turbinas é então convertida de corrente alternada (CA) para corrente contínua (CC) para garantir sua adequação ao processo de eletrólise. Nesse processo, a energia elétrica é direcionada a um eletrolisador, que utiliza água desmineralizada para separar os átomos de hidrogênio e oxigênio da molécula de água, resultando em hidrogênio e oxigênio de alta pureza (Calado e Castro, 2021). A produção de HV a partir de fontes renováveis, como a energia eólica, tem se destacado devido ao seu potencial de contribuir para a redução de GEE, favorecendo uma transição para fontes energéticas mais sustentáveis.

Pesquisas recentes exploram diferentes abordagens tecnológicas para otimizar essa produção. Por exemplo, Lee et al. (2022) propuseram um coletor de energia eólica híbrido denominado Triboelétrico-Eletromagnético Autoadaptativo (SA-TEH), que usa uma análise mecânica baseada em ímãs móveis. Este sistema opera de maneira independente da velocidade do vento, oferecendo maior autonomia no fornecimento de energia para a produção de HV. Razzhivin et al. (2022) sugeriram a aplicação de inércia sintética para melhorar a estabilidade dos sistemas de energia eólica-hidrogênio, demonstrando que otimizar esses parâmetros pode aumentar a estabilidade dinâmica e, consequentemente, o desempenho do sistema. Além disso, Annan et al. (2023) desenvolveram o sistema *Wind Trawler*, uma subestrutura trimarã autônoma para a produção de HV, que também funciona como gerador de energia e recipiente de transporte de energia. Os testes com esse sistema indicaram que ele pode ser competitivo em comparação com os sistemas convencionais, especialmente pela eliminação de subsistemas de amarração e transmissão elétrica.

2.3.4. Produção de hidrogênio verde a partir de energia solar

A produção de HV a partir de energia solar fotovoltaica se baseia na conversão da luz solar em eletricidade por meio de células fotovoltaicas. Quando a luz atinge as células, fôtons excita elétrons no material semicondutor, gerando uma corrente elétrica direta que é convertida em corrente alternada por meio de um inversor (Kabir et al., 2018). Esta eletricidade gerada é então utilizada para alimentar um processo de

eletrólise da água, separando os átomos de hidrogênio e oxigênio, o que resulta na produção de HV. Embora a produção de HV via energia solar tenha um grande potencial, ela ainda apresenta desafios econômicos, principalmente relacionados aos custos iniciais da infraestrutura necessária para a geração solar (Frowijn e Van Sark, 2021).

No entanto, avanços tecnológicos estão sendo realizados para reduzir esses custos. Naqvi et al. (2024) propuseram um sistema de eletrolisador alimentado por um módulo fotovoltaico, utilizando uma solução de hidróxido de sódio com concentração de 27% em massa como eletrólito. Os resultados demonstraram uma eficiência de conversão de energia de 15%, e o estudo indicou áreas para futuras melhorias na eficiência do eletrolisador. Em outro estudo, Alhussan et al. (2023) desenvolveram um algoritmo alternativo para melhorar a previsão da capacidade de geração de energia solar, validado por testes de análise estatística, que comprovou a eficácia na otimização do planejamento do sistema solar, com o objetivo de reduzir quedas de energia e melhorar a geração de energia. Além disso, Karaca & Dincer (2023) apresentaram um reator fotoeletroquímico inovador para a produção de HV, que demonstrou uma taxa de produção de hidrogênio de 0,62 µg/s com eficiência energética de 0,193% sob condições experimentais controladas. A pesquisa destaca o potencial do reator, embora a melhoria da eficiência permaneça como um desafio central para futuras investigações.

2.3.5. Produção de hidrogênio verde a partir de hidrelétricas

A produção HV a partir da energia hidrelétrica surge como uma estratégia relevante na transição energética global, especialmente em países com abundância de recursos hídricos. Essa forma de produção utiliza a eletricidade gerada em usinas hidrelétricas para alimentar o processo de eletrólise da água, resultando na geração de hidrogênio sem emissões de carbono. Diversos estudos recentes têm evidenciado o potencial técnico, econômico e ambiental dessa tecnologia em diferentes contextos geográficos (Nadaleti, Souza e Lourenço, 2022).

No Brasil, pesquisa recente de Botelho, Moraes e Oliveira (2024) analisou o aproveitamento da energia vertida excedente não armazenado ou utilizado nas usinas hidrelétricas como fonte para a produção de GH. O estudo identificou um potencial

expressivo de produção, variando entre 140,6 mil e 1,4 milhão de toneladas de hidrogênio por ano, principalmente nos subsistemas Sudeste/Centro-Oeste e Norte. Essa produção poderia representar até 7,43% do potencial nacional de hidrogênio de baixo carbono, com capacidade de gerar entre 2,814 e 28,134 GWh de eletricidade, contribuindo para evitar até 22,28 milhões de toneladas de emissões de CO₂.

Em paralelo, países como a Turquia e o Equador também têm explorado seus recursos hidrelétricos para fomentar a produção de hidrogênio. Na Turquia, a produção potencial foi estimada em 2,26 megatoneladas anuais, com destaque para as regiões de Şanlıurfa e Elazığ (Karayel, Javani e Dincer, 2023). Já o Equador, com matriz energética majoritariamente renovável, é apontado como um país com viabilidade para atender tanto à demanda interna quanto ao mercado externo emergente de HV (Recald et al., 2024).

A viabilidade econômica também é um fator decisivo. Na Indonésia os estudos de Hardana et al. (2024) o uso da energia excedente de pequenas centrais hidrelétricas para produção de HV foi avaliado com o modelo NREL H2A. A análise apontou a viabilidade do uso de eletrolisadores alcalinos e destacou a sensibilidade do custo nivelado do hidrogênio frente às variáveis operacionais, apontando o uso inicial do HV em misturas com gás natural como uma etapa viável na descarbonização

Esses estudos reforçam a relevância da energia hidrelétrica na produção de HV em diferentes realidades, contribuindo para a segurança energética, a diversificação da matriz elétrica e os esforços globais de descarbonização.

2.3.6. Produção de hidrogênio verde a partir do biogás

O biogás é gerado através da digestão anaeróbica da matéria orgânica, um processo biológico realizado por microrganismos em ambientes sem oxigênio, que decompõem a matéria orgânica em metano (CH₄) e dióxido de carbono (CO₂) (Karne et al., 2023). A produção de HV a partir do biogás ocorre por meio da reforma a vapor do metano, um processo termoquímico em que o metano reage com vapor d'água a altas temperaturas para formar uma mistura de hidrogênio e monóxido de carbono (CO), conhecida como gás de síntese. Em seguida, o monóxido de carbono pode ser convertido em CO₂ com geração adicional de hidrogênio, por meio da reação de deslocamento de gás d'água. O hidrogênio é então purificado, separando-se do CO₂.

restante (Pajak et al., 2023). Este processo é particularmente relevante para países com grande disponibilidade de resíduos agroindustriais, como o Brasil, que possui um grande potencial para aproveitar esses resíduos na produção de HV (Vaz Jr., 2020).

Exemplos de inovações tecnológicas também têm sido apresentados para otimizar a produção de HV a partir do biogás. Maluenda et al. (2023) propuseram um modelo estocástico com restrições de probabilidade para otimizar a operação de sistemas que combinam armazenamento de energia fotovoltaica (BESS, *Battery Energy Storage System*) com eletrolisadores. O modelo demonstrou um aumento de 10,2% nos lucros em comparação ao modelo determinístico, com benefícios adicionais de uma operação mais estável e uma produção de hidrogênio comparável à da operação autônoma fora da rede elétrica. A utilização de múltiplas fontes renováveis, como energia eólica, solar e biomassa, está se tornando uma prática cada vez mais comum na produção de HV, uma vez que a combinação dessas fontes permite maior flexibilidade e resiliência no fornecimento de energia. A matriz energética brasileira exemplifica bem essa diversificação, com uma predominância de hidrelétricas, mas também com uma crescente contribuição de fontes como solar, eólica e biomassa (Gehrke et al., 2021).

Além disso, Pang et al. (2021) exploraram a aplicação de Indústria 4.0 (IE) e SI na produção de hidrogênio, propondo um sistema multienergético de base renovável (RMES) que integra refrigeração, aquecimento, hidrogênio e energia, evidenciando as sinergias possíveis entre diferentes fontes renováveis e o aproveitamento de resíduos industriais.

2.4. A relação entre a simbiose industrial e o hidrogênio verde

A produção de HV envolve uma cadeia de etapas fundamentais: fornecimento de energia renovável, suprimento hídrico (água ou efluentes), eletrólise da água, e, por fim, armazenamento e distribuição. Cada uma dessas fases é crucial para a viabilização do ciclo completo de produção do HV (Azadnia et al., 2023). Como em qualquer processo produtivo, o fluxo dessas etapas pode ser ajustado a fim de aumentar a eficiência econômica e operacional (Lepage et al., 2021). Nesse contexto, a aplicação da SI emerge como uma estratégia promissora para tornar a produção de hidrogênio mais eficiente, rentável e ambientalmente sustentável. A integração desses conceitos possibilita a criação de redes produtivas interligadas, abrindo oportunidades

para aplicações transversais, inclusive em setores não diretamente relacionados à produção de hidrogênio (Farouk e Chew, 2021).

A potencial sinergia entre a SI e o HV tem sido objeto de investigação em estudos como o de Eljack e Kazi (2021) em que analisaram os desafios associados a uma abordagem de simbiose multisectorial industrial-urbana voltada à implementação da cadeia de suprimentos de hidrogênio. Essa abordagem busca otimizar a interação entre indústrias e o planejamento urbano, permitindo aplicações multifuncionais do HV por meio de um planejamento coordenado. De forma complementar, Butturi e Gamberini (2022) exploraram a criação de sinergias entre *clusters* industriais e áreas urbanas adjacentes como forma de promover a sustentabilidade local e viabilizar soluções de mobilidade de baixo carbono baseadas no uso de hidrogênio. Os autores destacam que as interações industriais podem representar um ponto de partida estratégico para a produção de HV em escala.

Nesse mesmo sentido, Sorrenti et al. (2023) avaliaram, por meio do estudo de caso da instalação *GreenLab Skive*, a primeira instalação industrial a integrar energia renovável em uma rede de SI, os impactos de diferentes fontes energéticas no custo e na pegada de carbono da produção de hidrogênio. Os resultados demonstraram que o uso de eletrolisadores alimentados por energia eólica, solar fotovoltaica e energia da rede promoveu redução significativa nas emissões de CO₂ e nos custos operacionais, resultando em uma economia de $30,6 \times 10^7$ kg de CO₂ e em um valor presente líquido duas vezes maior em comparação ao uso exclusivo de energia da rede elétrica. Já o estudo de Affery et al. (2021) investigou a viabilidade da produção de HV utilizando energia solar em combinação com efluentes oriundos de fábricas de óleo de palma e águas residuais. Por meio de quatro esquemas de integração e da aplicação de uma abordagem baseada na teoria dos jogos, os autores demonstraram que a cooperação entre diferentes redes pode maximizar o bem-estar coletivo e alcançar uma Otimização de Pareto em consonância com os objetivos globais de sustentabilidade e mitigação das mudanças climáticas.

A viabilidade econômica do HV para aplicação em múltiplas áreas operacionais está condicionada a uma combinação de fatores estruturais e conjunturais. Entre os principais elementos que influenciam essa viabilidade, destacam-se o custo dos eletrolisadores, a disponibilidade e estabilidade de fontes renováveis locais como solar

e eólica, bem como a existência de políticas públicas eficazes, incluindo subsídios, incentivos fiscais e regulamentações específicas que favoreçam a transição energética (Maciel et al., 2023). Nesse cenário, a aplicação de estratégias baseadas em SI desponta como um vetor de otimização, ao permitir o compartilhamento de infraestrutura, a reutilização de subprodutos e a integração de fluxos energéticos entre diferentes agentes produtivos (Schlüter e Milani, 2023).

Essa abordagem tem potencial para reduzir significativamente os custos logísticos e operacionais, além de favorecer ganhos de escala na produção de HV, especialmente em ambientes industriais caracterizados por alta intensidade energética (Lütje e Wohlgemuth, 2020). No entanto, apesar das vantagens estruturais proporcionadas pela SI, o elevado investimento inicial associado à implantação de eletrolisadores e à infraestrutura complementar ainda configura um obstáculo relevante à adoção em larga escala, particularmente em países em desenvolvimento, onde as restrições orçamentárias e a ausência de políticas coordenadas podem comprometer a implementação de projetos sustentáveis de grande porte (Jayachandran et al., 2024)

Conforme argumentado por Ismail (2020), a aplicação dos princípios da SI ao longo de toda a cadeia de valor pode favorecer significativamente a reutilização de subprodutos como calor e oxigênio, contribuindo para o uso mais eficiente dos recursos disponíveis. Estratégias como o aumento da eficiência energética na eletrólise, o avanço nas tecnologias de geração e armazenamento de energia renovável, e a recuperação de calor residual são caminhos promissores nesse contexto (Farah et al., 2024). No entanto, para que essas soluções sejam implementadas de forma eficaz, é essencial um planejamento estratégico que considere tanto o diagnóstico do cenário atual quanto as tendências e projeções futuras da área. Esse conhecimento orienta a definição de prioridades, investimentos e políticas públicas, permitindo um desenvolvimento mais sustentável e alinhado com os objetivos de descarbonização.

Nesse sentido, uma das ferramentas que auxilia na construção desse planejamento estratégico com foco em metas futuras é o *roadmap*. Essa metodologia, frequentemente representada por meio de esquemas visuais, estrutura ações específicas ao longo de uma linha temporal com o objetivo de alcançar um estado

desejado. Assim, o *roadmap* atua como uma espécie de guia que expressa a visão coletiva de um grupo sobre os caminhos necessários para atingir determinados objetivos no futuro (Phaal, Farrukh e Probert, 2004).

2.5. *Roadmap* tecnológico

O *roadmapping*, técnica originalmente desenvolvida pela Motorola, consolidou-se como uma ferramenta estratégica para o alinhamento entre tecnologia, inovação e demandas de mercado. Seu principal objetivo é mapear a trajetória tecnológica de uma organização e conectá-la às suas metas de longo prazo, orientando o desenvolvimento de produtos e serviços inovadores. Essa abordagem é materializada por meio de representações visuais estruturadas, que funcionam como guias para as iniciativas de pesquisa e desenvolvimento, assegurando que estas estejam em consonância com os objetivos estratégicos do negócio (Carvalho; Fleury; Lopes, 2013).

O processo de construção de um *roadmap* envolve a identificação de tecnologias emergentes, a análise de tendências de mercado, bem como a definição de metas e indicadores de desempenho. O resultado é um documento dinâmico que subsidia a tomada de decisões estratégicas. Nesse contexto, o *Technology Roadmap* se destaca por oferecer uma estrutura visual integradora, que alinha mercado, produto, tecnologia e evolução, delineando o caminho para o desenvolvimento de soluções tecnológicas de impacto (Rocha e Mello, 2016).

De maneira geral, a estrutura de um *roadmap* tecnológico é composta por camadas que refletem, de forma integrada, diferentes dimensões como a perspectiva comercial e a tecnológica geralmente organizadas ao longo de uma linha do tempo. Essa representação gráfica permite visualizar a progressão de produtos ou tecnologias, considerando aspectos como mercado, recursos, capacidades organizacionais e tendências futuras. A Figura 2 é uma representação de modelo de *roadmap* com essas características (Phaal, Farrukh e Probert, 2004).

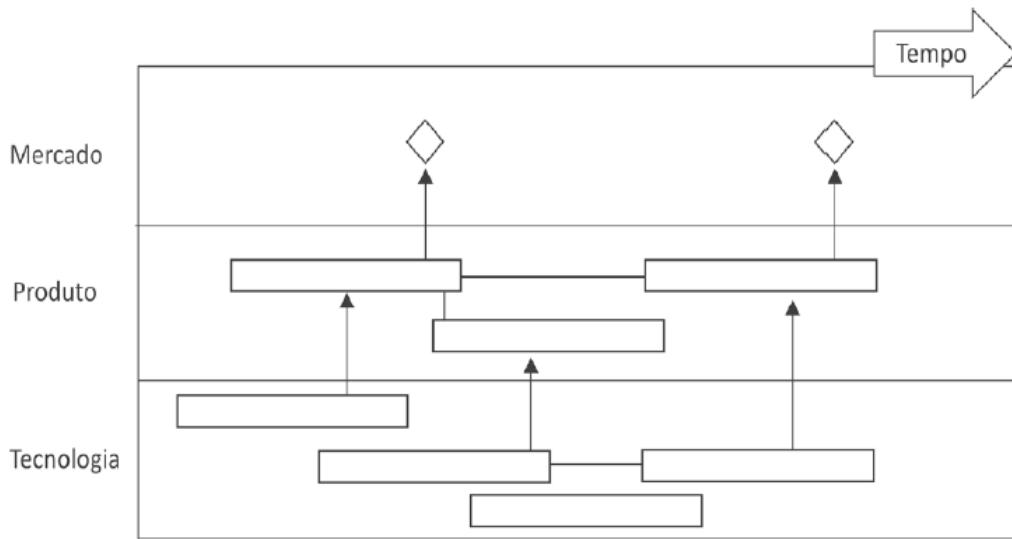


Figura 2. Modelo de *roadmap* Fonte: Phaal, Farrukh e Probert (2004).

Ao longo de sua evolução, a abordagem de *roadmapping* foi sendo adaptada por empresas, instituições de pesquisa e governos, a fim de atender a contextos e objetivos diversos. Essa flexibilidade metodológica é um dos fatores que explicam sua longevidade e ampla adoção. O método não apenas facilita a comunicação estratégica entre os diversos níveis de uma organização, como também pode ser customizado para diferentes finalidades, apresentando múltiplas formas de estruturação (Phaal, Farrukh e Probert, 2004). Dentre as abordagens específicas existentes, destaca-se a metodologia proposta por Borschiver e Lemos (2016), que estrutura o processo de construção do *roadmap* em três etapas principais, como é mostrado na Figura 3.

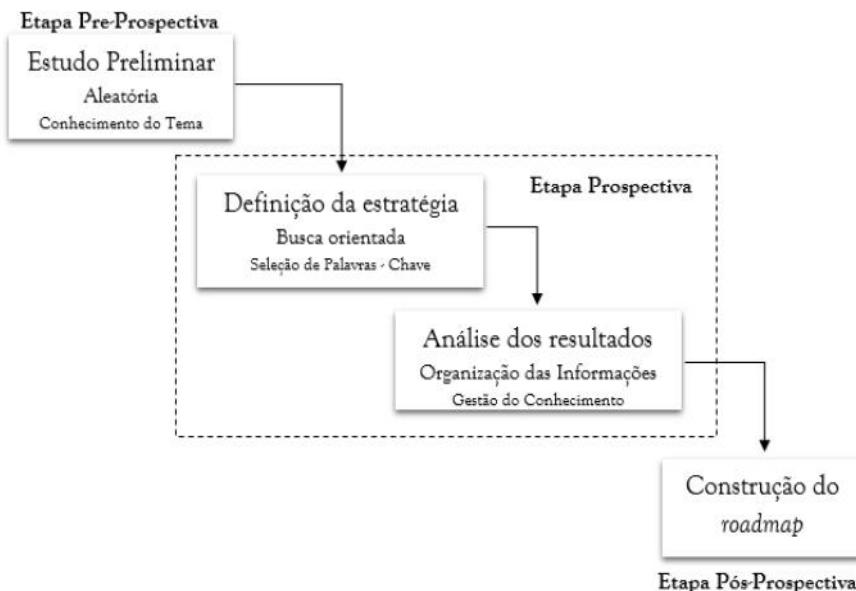


Figura 3. Organização metodológica do *roadmap* tecnológico. Fonte: Borschiver e Lemos (2016).

A primeira, denominada etapa pré-prospectiva, corresponde à fase exploratória, em que se realiza um levantamento preliminar dos temas-chave relacionados ao objeto de estudo, com base na análise de fontes como mídias especializadas, relatórios técnicos e bases de dados relevantes. Essa etapa é fundamental, pois define os termos e palavras-chave que nortearão a próxima fase. Em seguida, a fase de prospecção tecnológica consiste na coleta e análise de informações provenientes de diferentes fontes como artigos científicos, patentes, documentos corporativos e bancos de dados tecnológicos permitindo a identificação de tendências, tecnologias emergentes e oportunidades de desenvolvimento.

Na sequência, a etapa pós-prospectiva organiza os resultados obtidos nas fases anteriores em um formato visual, normalmente estruturado ao longo de uma linha do tempo. Essa etapa permite posicionar as tecnologias ou temas analisados em horizontes temporais distintos (curto, médio e longo prazo), classificando-os segundo seu estágio de maturidade tecnológica. A partir disso, torna-se possível compreender o estado atual do campo em estudo, avaliar sua evolução e projetar seu potencial de impacto e desenvolvimento futuro.

Ainda segundo o modelo de Borschiver e Lemos (2016), a estrutura do *roadmap* é composta por dois eixos: um eixo horizontal, que representa a dimensão

temporal dividido em Estágio Atual, Curto Prazo, Médio Prazo e Longo Prazo, e um eixo vertical, correspondente à taxonomia utilizada na análise. Essa taxonomia é definida com base nos resultados obtidos nas etapas anteriores e possibilita a realização de uma abordagem analítica em três níveis complementares: macro, meso e micro.

No nível macro, busca-se uma visão panorâmica do tema, abordando sua evolução histórica, distribuição geográfica da produção científica e tecnológica, além das principais instituições envolvidas como universidades, centros de pesquisa e empresas e suas redes de colaboração. No nível meso, a análise se aprofunda na categorização dos principais temas relacionados ao objeto de estudo, com base em uma taxonomia estruturada a partir da análise documental. Por fim, no nível micro, é realizada uma investigação detalhada de cada categoria identificada no nível meso, permitindo uma compreensão aprofundada das nuances e especificidades do campo analisado.

Diante da diversidade de conceitos apresentados que vão desde os fundamentos da EC e da SI até as rotas tecnológicas para a produção de HV, observa-se que o tema central deste trabalho se insere em um campo de pesquisa altamente interdisciplinar e estratégico para os desafios contemporâneos da transição energética. A integração entre SI e HV, embora promissora, ainda carece de abordagens sistematizadas e ferramentas que orientem sua aplicação prática e escalonamento industrial. Nesse contexto, a utilização de métodos como a análise bibliométrica e o *roadmap* tecnológico surge como alternativa metodológica robusta para compreender as dinâmicas atuais do conhecimento científico e projetar caminhos futuros de desenvolvimento tecnológico. Assim, a etapa seguinte deste trabalho busca operacionalizar essa proposta metodológica, oferecendo uma visão estruturada sobre o estado da arte e as possíveis trajetórias de inovação para a adoção integrada dessas duas abordagens.

3. METODOLOGIA

A presente pesquisa foi estruturada em duas fases complementares e interdependentes, projetadas para abordar o objetivo central de analisar

bibliometricamente e desenvolver um *roadmap* tecnológico para a produção de HV a partir de fontes renováveis, sob a perspectiva da SI.

- Análise Bibliométrica: A primeira fase consistiu em uma análise bibliométrica abrangente. O objetivo foi traçar um panorama detalhado da produção científica nas áreas de SI e HV. Serão mapeados os principais conceitos, identificados os autores e países mais influentes, as palavras-chave recorrentes e os periódicos de maior relevância. Adicionalmente, esta etapa buscou revelar as redes de colaboração entre pesquisadores e as tendências emergentes na literatura, fornecendo uma base sólida de conhecimento sobre o tema. Os dados dessa etapa englobam resultados desde 2014 até abril de 2024 os resultados dessa análise foram publicados como artigo no periódico *Discovery Sustainability*, intitulado “*Industrial symbiosis concept applied to green hydrogen production: a critical review based on bibliometric analysis*” (Conceito de simbiose industrial aplicado à produção de hidrogênio verde: uma revisão crítica com base na análise bibliométrica). As principais informações desse trabalho estão disponíveis para consulta na seção de anexos.
- Elaboração do *Roadmap* Tecnológico: A segunda fase do estudo foi dedicada à elaboração de um *roadmap* tecnológico. Este *roadmap* será diretamente subsidiado pelos achados da análise bibliométrica. Ao integrar os dados e as tendências identificadas na literatura, o *roadmap* visa propor possíveis direções futuras para o desenvolvimento integrado da produção de HV com os princípios da SI. Esta abordagem garante que as rotas tecnológicas propostas sejam cientificamente embasadas, alinhadas com os avanços mais recentes e capazes de preencher lacunas ou explorar oportunidades identificadas no panorama acadêmico. A pesquisa e construção do *roadmap* foi realizada no período de agosto de 2024 até maio de 2025.

A transição entre a primeira e a segunda fase é crucial, pois a análise bibliométrica serve como o pilar fundamental para o *roadmap*. Essa integração assegura que as propostas tecnológicas sejam consistentes com o estado da arte e capazes de impulsionar o avanço do campo.

3.1. Análise bibliométrica

A análise bibliométrica é uma abordagem que permite avaliar a produção científica de determinada área do conhecimento por meio da aplicação de métodos estatísticos e matemáticos. De acordo com Ellegaard (2018), a revisão bibliométrica é uma ferramenta poderosa para explorar a estrutura, desenvolvimento e dinâmica de um campo de estudo. Essa metodologia se destaca por permitir a análise de grandes volumes de dados, o mapeamento de tendências, a identificação dos principais autores, periódicos, países e colaborações institucionais.

Além disso, Tamala et al. (2022) destacam que os resultados de uma análise bibliométrica podem ser aprimorados por meio de análises de redes, com o uso de métricas específicas e técnicas de agrupamento, o que oferece uma visão mais profunda e abrangente da estrutura dos dados coletados. Esse tipo de análise revela interconexões entre autores, instituições, palavras-chave e outros elementos relevantes da literatura científica, contribuindo para a identificação de lacunas e oportunidades de pesquisa.

Para esta pesquisa, a análise bibliométrica foi desenvolvida em duas etapas principais. A primeira consistiu em uma análise de desempenho, conforme metodologia descrita por Chrysikopoulos et al. (2024), cujo objetivo é realizar um levantamento quantitativo e descritivo das publicações, autores, países e periódicos envolvidos no tema pesquisado. Na sequência, foi realizada a análise de redes, envolvendo mapeamentos de coautoria e coocorrência de palavras-chave. A coocorrência, também denominada rede semântica, é responsável por explorar a relação entre palavras-chave dentro dos artigos, enquanto a análise de coautoria trata das conexões entre autores, países e instituições, revelando as colaborações no desenvolvimento da área científica em questão. Todas as análises foram guiadas por parâmetros previamente definidos para assegurar a consistência e reproduzibilidade dos resultados.

Os resultados obtidos nessa fase bibliométrica também serviram como base para a construção do *roadmap* tecnológico, permitindo que as diretrizes traçadas fossem fundamentadas em evidências extraídas diretamente da literatura científica.

3.1.1. Dados bibliométricos

Para assegurar a confiabilidade dos dados utilizados na análise bibliométrica, foi empregada a base de dados Scopus, que se destaca como uma das mais relevantes fontes de informação científica internacional. A escolha dessa base justifica-se pela sua abrangência e qualidade, sendo considerada um dos maiores repositórios de artigos científicos revisados por pares. Segundo Pranckute (2021) e Khan et al. (2023), a base Scopus abrange mais de 34.346 publicações científicas, incluindo revistas, periódicos e conferências, bem como mais de 36.377 livros provenientes de 11.678 editoras. Além disso, o Scopus oferece um robusto sistema de métricas de citação, permitindo avaliar o impacto, a relevância e a disseminação das pesquisas, além de fornecer informações detalhadas sobre os autores, suas afiliações institucionais, áreas de atuação e colaborações.

Adicionalmente, a plataforma facilita o rastreamento da evolução de tópicos específicos ao longo do tempo, identificando tendências emergentes em distintas áreas do conhecimento. Outro aspecto relevante que justificou sua escolha foi a padronização e estruturação dos dados exportados, que facilitam sua integração com softwares de visualização e análise de redes, como o VOSviewer.

A etapa inicial da pesquisa consistiu na definição das palavras-chave relacionadas ao escopo do estudo, com o objetivo de garantir a recuperação de publicações relevantes e atualizadas. O processo de seleção considerou termos técnicos diretamente vinculados ao objeto de estudo, bem como palavras associadas às principais tendências e tecnologias emergentes na área de transição energética, EC e HV. Para isso, também foram observados termos frequentemente encontrados em artigos já analisados na literatura. Assim, foram definidas como palavras-chave principais:

- Green Hydrogen, Industrial Symbiosis, Circular Economy, Eco-Industrial Parks, Network e Hybrid System.

Com base nas palavras-chave selecionadas, foram construídas expressões de busca utilizando operadores booleanos (AND e OR), com o intuito de abranger de forma ampla as publicações relevantes sem comprometer a especificidade temática. As combinações principais resultantes dessa etapa foram:

- Combinação 1: “Industrial Symbiosis” OR “Circular Economy” OR “Industrial Ecology” AND “Green Hydrogen”
- Combinação 2: “Industrial Symbiosis” OR “Eco-Industrial Parks*” AND “Hybrid System*” AND “Green Hydrogen”
- Combinação 3: “Industrial Symbiosis” OR “Network*” AND “Green Hydrogen”

A aplicação dessas expressões foi realizada na base Scopus, com a utilização de filtros específicos para refinar os resultados obtidos. Os critérios de filtragem utilizados foram:

- Período de publicação: de 2014 a 2024
- Idioma: Inglês
- Tipo de documento: Artigos científicos

Esses filtros visaram garantir a atualidade, relevância e qualidade dos documentos analisados, A Tabela 1 apresenta as *strings* de busca utilizadas com todos os refinamentos aplicados.

Tabela 1 – Resultado refinado das combinações

Combinações	Strings de busca refinado
"Industrial Symbiosis" OR "Circular economy" OR "industrial ecology" AND "Green Hydrogen"	(ALL ("Industrial Symbiosis") OR ALL ("Industrial Ecology") OR ALL ("Circular Economy") AND ALL ("Green Hydrogen")) AND PUBYEAR > 2013 AND PUBYEAR < 2025 AND (LIMIT-TO (DOCTYPE, "ar")) AND (LIMIT-TO (SUBJAREA, "ENER") OR LIMIT-TO (SUBJAREA, "ENVI") OR LIMIT-TO (SUBJAREA, "ENGI")) AND (LIMIT-TO (LANGUAGE, "English")) AND (LIMIT-TO (EXACTKEYWORD, "Green Hydrogen") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD, "Circular

	Economy") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD, "Renewable Energy"))
"Industrial symbiosis" OR "Eco- Industrial Parks*" OR "Hybrid System*" AND "Green Hydrogen"	(ALL ("Industrial Symbiosis*") OR ALL ("Eco-Industrial Parks*") OR ALL ("Hybrid System*") AND ALL ("Green Hydrogen")) AND PUBYEAR > 2013 AND PUBYEAR < 2025 AND (LIMIT-TO (DOCTYPE, "ar")) AND (LIMIT-TO (SUBJAREA, "ENER") OR LIMIT- TO (SUBJAREA, "ENGI") OR LIMIT- TO (SUBJAREA, "ENVI")) AND (LIMIT-TO (LANGUAGE, "English")) AND (LIMIT-TO (EXACTKEYWORD, "Green Hydrogen") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD, "Hybrid Energy System"))
"Industrial Symbiosis" OR Netwok* AND "Green Hydrogen"	(ALL ("Industrial Symbiosis") OR TITLE-ABS-KEY (Network*) AND ALL ("Green Hydrogen")) AND PUBYEAR > 2013 AND PUBYEAR < 2025 AND (LIMIT-TO (EXACTKEYWORD, "Green Hydrogen") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD, "Hybrid Systems") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD, "Energy Systems")) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE, "ar")) AND (LIMIT-TO (LANGUAGE, "English")) AND

(LIMIT-TO (SUBJAREA, "ENER")
 OR LIMIT-TO (SUBJAREA, "ENVI")
 OR LIMIT-TO (SUBJAREA,
 "ENGI"))

Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

A extração dos dados foi realizada diretamente da plataforma Scopus, com os arquivos sendo salvos em formato csv, compatível com ferramentas de análise bibliométrica. Entre os principais softwares utilizados para esse tipo de análise, destacam-se o *VOSviewer*, *Bibliometrix*, *Bibexcel*, *Pajek*, *Gephi*, *SciMat*, *Sci2* e *UCINET*, conforme apontado por Douthu et al. (2021).

Neste estudo, optou-se pelo uso do *VOSviewer* (versão 1.6.20), de acordo com Bukar et al. (2023), o *VOSviewer* é uma ferramenta baseada na linguagem Java, desenvolvida especificamente para construir e visualizar mapas de redes com base em dados bibliométricos. O software permite realizar análises de cocitação, acoplamento bibliográfico, coautoria e coocorrência de palavras-chave, por meio da técnica de Visualização de Similaridade (VOS). Essa abordagem facilita a identificação de agrupamentos temáticos, tendências emergentes e áreas consolidadas do conhecimento, fornecendo suporte estratégico para a compreensão do panorama científico do tema analisado.

3.2. *Roadmap* tecnológico

Para a construção do *roadmap* tecnológico será adotado o modelo desenvolvido por Borschiver e Lemos (2016), cujo método já foi brevemente descrito na **seção 2.5**. Essa metodologia é amplamente utilizada para identificar, mapear e estruturar informações sobre tecnologias emergentes e oportunidades de inovação, servindo como base para a análise prospectiva de mercados e tecnologias. O *roadmap* é estruturado em três etapas principais: pré-prospectiva, prospecção tecnológica e pós-prospectiva, cada uma com objetivos específicos que se complementam para oferecer uma visão abrangente e integrada do campo de estudo.

A etapa pré-prospectiva, considerada a fase exploratória do processo, será realizada em paralelo com as análises bibliométricas já descritas, permitindo que os termos, palavras-chave e conceitos fundamentais sejam definidos com precisão. Esta

etapa envolve o levantamento de temas-chave a partir de mídias especializadas, relatórios técnicos e bases de dados relevantes, criando a base conceitual para as fases subsequentes.

Na etapa de prospecção tecnológica, serão coletadas e analisadas informações provenientes de diversas fontes, incluindo artigos científicos e documentos de patentes, para identificar tendências, tecnologias emergentes e potenciais oportunidades de desenvolvimento. Para a coleta de artigos científicos, foram utilizadas as bases de dados Scopus e *Web of Science*, reconhecidas por sua abrangência e relevância no campo científico. Além disso, para a análise de patentes, foram utilizadas a base de dados *Derwent Innovations Index*, que oferece acesso a mais de 30 milhões de invenções e mais de 65 milhões de documentos de patentes, permitindo buscas detalhadas e análises aprofundadas sobre o estado da arte tecnológica (*Web of Science*, 2023). As combinações de palavras-chave utilizadas em cada caso são apresentadas na Tabela 2 a seguir, considerando os resultados obtidos na análise bibliométrica e as especificidades do campo de estudo.

Tabela 2 - Combinações utilizadas para etapa de busca do *roadmap*

Combinação	Aplicação
"Industrial Symbiosis" OR Network* AND "Green Hydrogen"	Scopus / Web of Science
((TS=(Hydrogen)) AND TS= ("renewable resources")) AND TS=(Production*)) OR TS= ("Renewable Hydrogen")	Derwent Innovations Index

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A etapa pós-prospectiva é focada na organização dos dados obtidos nas fases anteriores em um formato visual estruturado, permitindo a representação dos avanços tecnológicos ao longo de diferentes horizontes temporais (curto, médio e longo prazo). Para esta fase, será utilizado o software Microsoft Visio, uma ferramenta robusta para criação de fluxogramas, organogramas e outras representações visuais complexas, que facilitará a interpretação e comunicação dos resultados (Microsoft, 2025). Essa

estrutura visual é essencial para a compreensão do estado atual do campo estudado e para a projeção de seu desenvolvimento futuro, possibilitando a construção de cenários tecnológicos que orientam a tomada de decisões estratégicas. A Figura 4 mostra um exemplo de como foi construído o *roadmap*. Com essa metodologia estruturada, espera-se mapear de forma precisa as principais tendências tecnológicas, identificando oportunidades estratégicas para inovação e desenvolvimento no campo estudado.

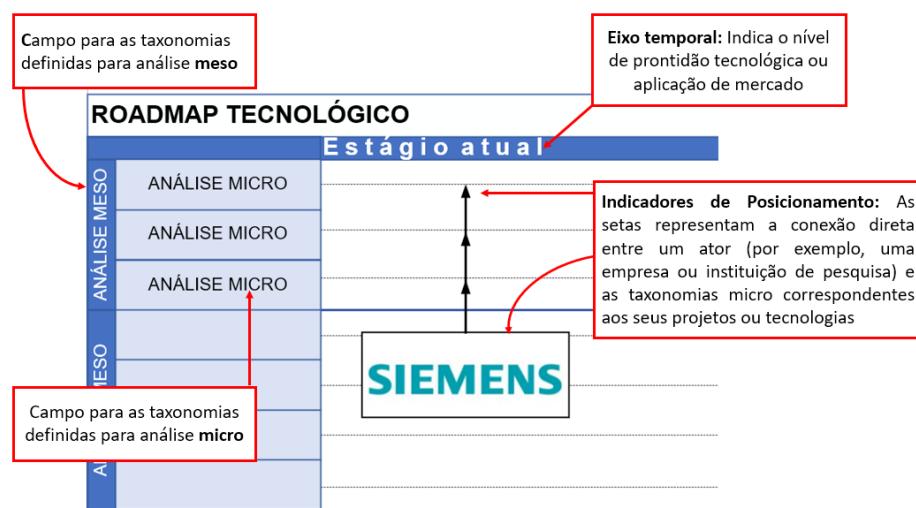


Figura 4 - Exemplo do layout utilizado para construção do *roadmap* e suas características. Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Por fim, após a elaboração do *roadmap* tecnológico, foi realizada uma análise do nível de maturidade das tecnologias identificadas, com base na classificação TRL (*Technology Readiness Level*). Essa abordagem, originalmente desenvolvida pela NASA permite avaliar o grau de desenvolvimento e prontidão de uma tecnologia, variando do TRL 1 (princípios básicos observados) ao TRL 9 (tecnologia comprovada em ambiente operacional real) (Moorhouse, 2002). É importante notar que as escalas de nível de maturidade tecnológica da e do departamento de defesa dos EUA são amplamente utilizadas, fornecendo subsídios para diversas funções de engenharia de sistemas e gerenciamento de projetos (Conrow, 2011). A utilização desse sistema facilita a compreensão do estágio de evolução das soluções tecnológicas mapeadas, além de fornecer subsídios para o planejamento estratégico e a priorização de investimentos em PDel.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Esta etapa apresenta os resultados e a discussão dos mesmos a partir dos dados obtidos nas duas etapas metodológicas deste estudo, conforme previamente delineado. O objetivo é fornecer uma compreensão clara dos achados da pesquisa, desde o mapeamento da produção científica até a proposição de direções futuras para o desenvolvimento do HV a partir de fontes renováveis, sob a perspectiva da SI.

- A primeira etapa dos resultados detalha a análise bibliométrica em que serão apresentados os dados referentes ao desempenho geral das buscas e a quantificação dos artigos, seguidos pela identificação dos autores, países, palavras-chave e periódicos mais relevantes no campo, seguidos das suas respectivas análises de rede de colaboração.
- Posteriormente, o capítulo aborda a construção e discussão do *roadmap* tecnológico. Com base nos norteamentos derivados da análise bibliométrica, serão exploradas as análises macro, meso e micro que sustentaram a elaboração do *roadmap*. Esta seção culmina na apresentação das direções estratégicas e recomendações para o desenvolvimento integrado da produção de HV e sua sinergia com a SI.

4.1. Análise de desempenho

A partir das combinações criadas, os resultados da busca geraram, inicialmente, um total geral de 3.271 buscas sem os limites de refinamento atribuídos. Individualmente, a Combinação 1 resultou em um total de 1.070 artigos, a Combinação 2 1.228 artigos e a Combinação 3 973 artigos. Com a aplicação dos parâmetros de refinamento, foi observada uma grande diminuição no número de artigos encontrados. A Tabela 3 demonstra o resultado geral da busca.

Tabela 3 - Resultado de busca das combinações 1,2 e 3 apresentando o resultado geral e com o refinamento

Combinação de pesquisa	Resultado		Resultado refinado
	geral		
1. "Industrial "Circular "Economy"	Symbiosis" Economy"	OR OR	1070 140

"Industrial Ecology" AND "Green Hydrogen"		
2. "Industrial Symbiosis" OR "Eco-Industrial Parks**" OR "Hybrid System**" AND "Green Hydrogen"	1228	129
3. "Industrial Symbiosis" OR "Netwok**" AND "Green Hydrogen"	973	96
Total	3271	365

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Os resultados iniciais da busca apresentaram um panorama introdutório mais extenso a partir do número significativo de artigos encontrados no primeiro instante da busca, conforme demonstrado na Tabela 3, esse cenário permite observar que os conceitos de SI e HV são abrangentes e podem ser pesquisados de forma multidisciplinar gerando trabalhos que abrangem diferentes áreas do conhecimento.

Com os parâmetros de refinamento aplicados, o panorama geral dos artigos encontrados assumiu uma característica mais escassa, com um total de 365 artigos encontrados. Conforme demonstrado na Tabela 3, a Combinação 3 demonstrou o menor número de resultados, possivelmente devido à sua concentração nos termos SI e HV, sugerindo um tema emergente ainda pouco explorado na literatura científica. Da mesma forma, as Combinações 1 e 2 também apresentaram redução significativa após o refinamento. Um dos objetivos do refinamento é direcionar os resultados para o cerne da pesquisa, permitindo a compreensão do estágio de desenvolvimento do tema. Nesse caso, a redução nas combinações mencionadas pode indicar um tema emergente em estágio inicial.

A característica de um tema emergente em um campo de pesquisa sugere que há questões não respondidas ou aspectos pouco explorados, o que pode indicar oportunidades de avanço no conhecimento e oportunidades para novas descobertas. Além disso, o tema proposto para esta pesquisa vem aumentando em número de pesquisas ao longo dos anos, representando um interesse crescente na área, como

pode ser observado na Figura 5 que mostra a tendência das pesquisas sobre o tema proposto ao longo dos anos.

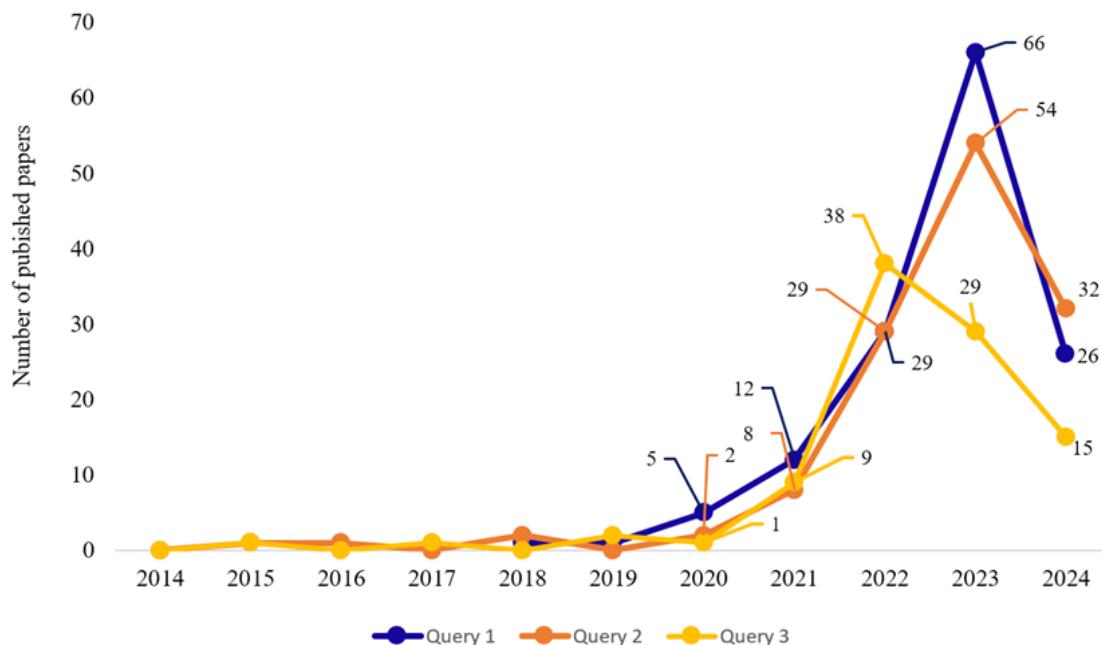


Figura 5. Relação de crescimento por ano em relação aos temas SI e HV abril de 2024. Fonte: Elaborado pelo Autor (2024)

A Figura 5 apresenta o número de publicações até abril de 2024 em que ilustra um cenário exponencial quanto ao número de publicações por ano. Observa-se que, após um período de publicações mais modestas até 2019, há uma ascensão acentuada a partir de 2020, culminando em picos significativos de artigos publicados em 2023 para as diferentes consultas de pesquisa, outra perspectiva que pode ser observada é que já em 2024 até o período da pesquisa 73 artigos foram identificados, o que já representa quase metade do total de publicações de 2023 (149). Esse comportamento é similar ao observado nas pesquisas de Qin et al. (2020) e Mallawaarachchi et al. (2020), que associam diretamente tal expansão à crescente preocupação global com a descarbonização. Nesse contexto, a transição energética, com foco na substituição de combustíveis fósseis por fontes renováveis como o HV, emerge como a principal estratégia para alcançar essa meta, conforme apontado por Zhang et al. (2021). A proliferação de pesquisas nessa área reflete a busca contínua por soluções inovadoras que tornem a produção de HV mais eficiente, economicamente viável e ambientalmente sustentável. Essa notável expansão no

primeiro semestre do ano demonstra a tendência contínua de crescimento do tema, impulsionada também por sua característica multidisciplinar, que possibilita maior abrangência na produção científica.

A Figura 6 corrobora o aspecto multidisciplinar ao apresentar uma visão geral das áreas com maior incidência de publicação. Pode-se notar a predominância de campos como Energia (34%), Engenharia (17%) e Ciência Ambiental (14%), mas a presença significativa de diversas outras disciplinas, como Física e Astronomia, Matemática, Engenharia Química, Química, Gestão e Negócios, Ciências Sociais e Ciência da Computação, evidencia claramente a amplitude multidisciplinar que é intrínseca a este campo de pesquisa.

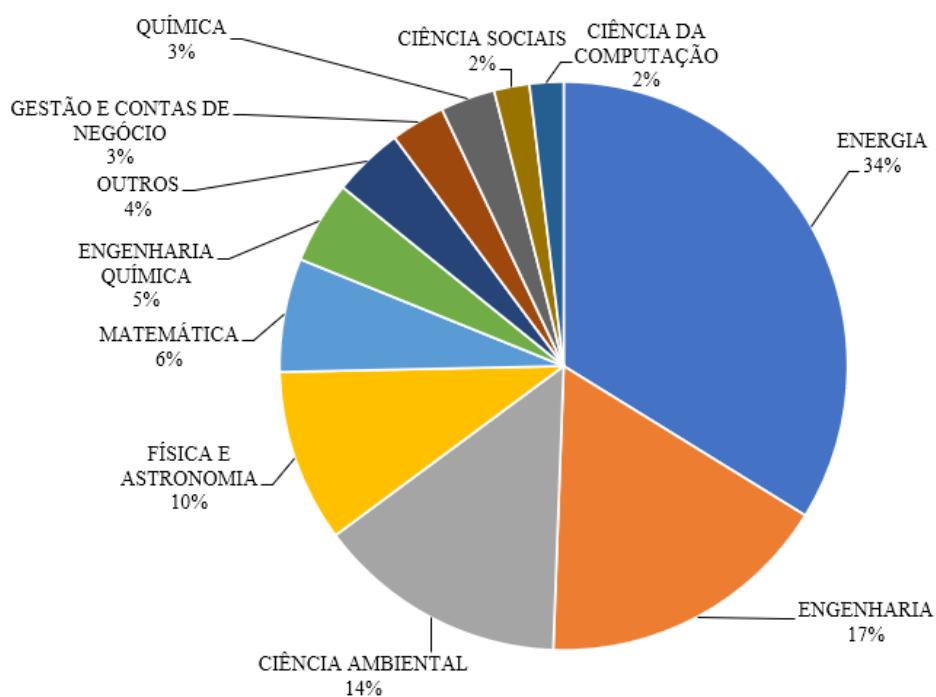


Figura 6. Percentual de pesquisa dos temas SI e HV por área. Fonte: Elaborado pelo autor, (2024).

A análise da distribuição das áreas de pesquisa foi baseada na análise feita por Safronova e Barisa (2023) com objetivo de visualizar em qual área as pesquisas estão mais concentradas e produzem mais publicações. As áreas de energia e engenharia lideram o *ranking*, com 34% e 17% das publicações. Isso é esperado, pois a SI envolve a otimização de processos industriais e a produção de HV requer o desenvolvimento

de tecnologias e infraestruturas específicas. Há também uma forte presença das Ciências Ambientais com 14% das publicações. Essa alta representatividade se justifica pela natureza sustentável do HV e pela busca por soluções que minimizem o impacto ambiental da produção industrial.

A área de Física e Astronomia tem uma participação relevante nas pesquisas sobre HV e SI devido ao seu papel central no desenvolvimento de tecnologias de conversão e armazenamento de energia, como a eletrólise da água, células fotoeletroquímicas e semicondutores avançados. A física fornece fundamentos para a otimização de processos eletroquímicos e para a modelagem energética de sistemas industriais interligados, essenciais à integração promovida pela SI. Além disso, muitos periódicos classificados nessa área abrangem temas de física aplicada e materiais, comuns nas pesquisas de HV. Referências como McKone et al., (2013) e Chertow (2000) ilustram a interface entre física, sustentabilidade e inovação tecnológica.

As demais áreas, como Química, Engenharia Química, Matemática e Ciências da Computação, contribuem com uma parcela menor, mas igualmente relevante para o desenvolvimento da pesquisa em SI e HV. A Química, por exemplo, é fundamental para o desenvolvimento de catalisadores eficientes para a produção de hidrogênio. A Matemática e a Ciência da Computação são essenciais para a modelagem e otimização de processos complexos.

4.1.1. Desempenho dos autores

Além de analisar tendências de publicação, uma análise do desempenho dos autores foi conduzida para oferecer um panorama sobre os principais contribuintes neste campo de estudo e entender quais pesquisadores apresentam um impacto relevante. Esta análise nos permite identificar os autores mais prolíficos e as colaborações mais frequentes entre pesquisadores. A Tabela 4 apresenta os principais contribuintes, classificados com base no número de artigos publicados.

Tabela 4 - Principais autores relacionados ao SI combinado com HV

Autor	Número de artigos publicados	Citações
1. Barhoumi, EM	5	60

2. Okonkwo, PC	3	55
3. Nadaleti , WC	3	86
4. Frankowska, M.	3	10

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

A Tabela 4 inclui um total de 14 artigos de autoria dos quatro principais colaboradores. Isso representa um número significativamente menor em comparação aos 87 artigos analisados por Kar et al. (2022) em seu estudo sobre a economia do hidrogênio. Essa diferença sugere que a pesquisa relacionada à aplicação de SI na produção de HV ainda está em seus estágios iniciais, caracterizada por um número relativamente limitado de publicações por autor. Esse padrão é típico de campos interdisciplinares e tópicos emergentes, onde a consolidação científica e a expansão das contribuições ainda estão em andamento.

Barhoumi EM se destaca como o autor líder em termos de número de publicações, com um total de cinco artigos. Sua pesquisa se concentra na integração de múltiplas fontes de energia renováveis para produção de HV, enfatizando a otimização da sustentabilidade e viabilidade econômica nesses processos. Seu trabalho contribui diretamente para o avanço da compreensão de sistemas integrados e a aplicação prática de conceitos de SI. Destaca-se sua pesquisa *intitulada Optimized design of autonomous solar-wind hybrid power systems for hydrogen refueling station case study* (Design otimizado de sistemas autônomos híbridos de energia solar-eólica para estudo de caso de estação de reabastecimento de hidrogênio), que se concentra na otimização de sistemas autônomos híbridos de energia solar-eólica para alimentar veículos elétricos (VEs) e produzir HV para veículos de célula de combustível (FCVs). Ao analisar várias configurações de energia renovável incluindo painéis fotovoltaicos, turbinas eólicas, células de combustível e eletrolisadores o estudo identifica os sistemas mais econômicos e eficientes. Os resultados destacam que um sistema de bateria fotovoltaica atinge o menor Custo Presente Líquido (NPC), enquanto os sistemas de células de combustível eólicas incorrem em custos mais altos devido a componentes caros.

Outro autor proeminente, Okonkwo PC, frequentemente colabora com Barhoumi EM, explorando tópicos semelhantes, particularmente no desenvolvimento de estratégias de SI para geração de HV. Entre suas contribuições mais notáveis está o artigo *Techno-economic analysis and optimization of solar and wind energy systems for hydrogen production: a case study* (Análise técnico-econômica e otimização de sistemas de energia solar e eólica para produção de hidrogênio: um estudo de caso). Este estudo examina um sistema híbrido de geração de energia em Salalah, Omã, utilizando energia solar fotovoltaica, energia eólica, células de combustível e armazenamento de hidrogênio. A pesquisa conclui que este sistema oferece o menor custo nivelado de hidrogênio e energia em comparação com outros sistemas propostos, demonstrando sua viabilidade econômica.

Embora Nadaleti WC tenha apenas três publicações, ele detém a maior contagem de citações, destacando a relevância de seus estudos na área. Seu trabalho se concentra no uso de energia renovável, particularmente a eólica, para a produção de HV. Um de seus artigos mais citados, com 31 menções, investiga a viabilidade da produção de hidrogênio a partir da energia eólica no Brasil, avaliando diferentes cenários para aplicação prática. Outro estudo digno de nota é o artigo *Integration of renewable energies using the surplus capacity of wind farms to generate H₂ and electricity in Brazil and in the Rio Grande do Sul state* (Integração de energias renováveis utilizando a capacidade excedente de parques eólicos para geração de H₂ e eletricidade no Brasil e no Rio Grande do Sul), que aborda a integração de energia excedente em um contexto de EC.

Frankowska, por sua vez, concentra sua pesquisa em estágios de pós-produção de hidrogênio, como armazenamento, distribuição e aplicações industriais. Seu artigo, *Structural model of power grid stabilization in the green hydrogen supply chain system conceptual assumptions* (Modelo estrutural de estabilização da rede elétrica no sistema da cadeia de suprimentos de hidrogênio verde: premissas conceituais) representa uma contribuição significativa para o campo. Este trabalho propõe um modelo multicritério teórico para estabilizar as operações da rede elétrica usando hidrogênio como um *buffer* de energia, enfatizando sua aplicabilidade em sistemas de energia descentralizados.

4.1.2. Desempenho por país

Os 365 artigos resultaram em contribuições de mais de 70 países. Identificar os países mais ativos neste tópico pode indicar potenciais oportunidades para parcerias e colaborações internacionais, além de destacar áreas em que certos países têm *expertise* e liderança no campo de estudo. Os dados referentes aos países com maior número de publicações foram obtidos da base de dados Scopus, enquanto o número de citações foi analisado usando o software VOSviewer. A Tabela 5 apresenta os 10 países com maior número de publicações, fornecendo uma visão clara da distribuição global das contribuições.

Tabela 5 - Principais países relacionados ao tema SI e HV

País	Número de artigos	Citações
China	47	511
Itália	46	571
Espanha	25	297
Índia	23	266
Alemanha	22	289
Austrália	22	257
EUA	20	267
Brasil	19	153
Reino Unido	16	346
Peru	15	287

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Países com maior volume de publicações apresentam uma concentração mais significativa de atividade de pesquisa, muitas vezes estabelecendo uma liderança clara no campo. Nesse contexto, a China se destaca como líder tanto no número de publicações (47) quanto de citações (511). Essa liderança é amplamente atribuída aos

recursos e investimentos substanciais da China no desenvolvimento de energia renovável. Estudos de Huang e Liu (2020) e Camargo et al. (2023) enfatizam que o governo chinês alocou financiamento considerável para promover tecnologias sustentáveis, incluindo a produção de HV como parte de sua estratégia abrangente para reduzir as emissões de carbono e promover o desenvolvimento sustentável. Além disso, a robusta infraestrutura industrial da China e a ampla capacidade de produção fornecem uma vantagem competitiva, particularmente na SI, onde a integração eficiente de processos industriais pode proporcionar vantagens econômicas e ambientais substanciais.

Um estudo de Akhtar et al. (2018), que se concentra no cenário global de pesquisa em SI, destaca a liderança da China neste campo, seguida pelo Reino Unido e Estados Unidos. Além da China, os dados da Tabela 4 destacam as contribuições notáveis de países europeus como Itália, Espanha, Alemanha e Reino Unido, refletindo a força da Europa em PDel em tecnologias sustentáveis. A Turquia também demonstra importância estratégica devido à sua localização geográfica, fazendo a ponte entre a Europa e a Ásia, o que reforça seus avanços em publicações científicas. Embora o Brasil esteja entre os 10 principais países com o maior número de artigos, sua produção permanece significativamente menor em comparação às nações líderes. Essa disparidade sugere um potencial inexplorado para o Brasil expandir seus investimentos em PDel relacionados às tecnologias de SI e HV, potencialmente se posicionando como um futuro líder no campo.

No geral, a análise de desempenho revela números relativamente baixos de publicações e citações em comparação com outros estudos bibliométricos, como Alhassan et al. (2022), que investigou os desafios da reforma de metano seco para produção de hidrogênio, ou Yan et al. (2023), que explorou a neutralidade de carbono em parques industriais por meio de uma revisão de literatura e mapeamento de conhecimento. No entanto, a natureza emergente do tópico provavelmente é responsável por esses números modestos, já que HV e SI permanecem em estágios iniciais de exploração em várias dimensões. Isso ressalta a necessidade de pesquisa e desenvolvimento contínuos para desbloquear totalmente o potencial dessas tecnologias no avanço de soluções de energia sustentável. Um exemplo de crescimento nessa área é o estudo de Neri et al. (2024), que apresentou um modelo de projeto de rede multiobjetivo para simbiose urbano-industrial, incorporando

tecnologias de digestão anaeróbica, cogeração, energia fotovoltaica e produção de hidrogênio. Além disso, as pesquisas de Savian et al. (2023) e Sorrenti et al. (2023) também contribuem para esse campo emergente.

Além disso, a Organização das Nações Unidas para o Desenvolvimento Industrial (UNIDO) publicou um relatório em 2023 intitulado *Applications of Green Hydrogen in Eco-Industrial Parks Best Practice Series* (Série de Melhores Práticas sobre Aplicações do Hidrogênio Verde em Parques Ecoindustriais) (UNIDO, 2023), que se refere a áreas ou *clusters* industriais onde há um uso coletivo de HV (incluindo sua produção, transporte e aplicação) e eletricidade de energia renovável. Essas regiões também usam recursos diversos para atender a múltiplos propósitos, como fabricação de materiais, aquecimento e resfriamento, transporte local e matérias-primas industriais.

4.1.3. Desempenho das palavras-chave

A investigação das palavras-chave mais recorrentes e suas conexões oferece uma compreensão aprofundada dos temas centrais, das tendências emergentes e das áreas de maior concentração de pesquisa no campo estudado. Esta análise permite identificar os conceitos mais discutidos pelos próprios autores e a interrelação entre eles, fornecendo um mapa conceitual da literatura. A Tabela 6 apresenta as dez palavras-chave com maior ocorrência e sua respectiva força de interação.

Tabela 6 - Relação das palavras-chave com maior frequência

Palavras- chave	Ocorrência	Força de interação
Hydrogen production	161	2261
Green hydrogen	174	2074
Hydrogen	75	1159
Solar power generation	73	1088
Hydrogen storage	73	1084
Renewable energy	76	1020

Renewable energies	63	923
Economic analysis	52	809
Carbon dioxide	48	772
Renewable energy resources	56	739

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

A Tabela 6 revela um claro domínio de termos diretamente relacionados à produção e natureza do hidrogênio, o que é esperado dada a temática da pesquisa. *Green hydrogen* se destaca com a maior ocorrência (174), demonstrando o foco crescente da pesquisa na sustentabilidade e nas fontes renováveis para a produção de hidrogênio. Este dado corrobora estudos como o de Rodríguez-Aburto et al. (2024). Embora *hydrogen production* apareça com 161 ocorrências, sua força total de interação (2261) é a mais elevada da lista, superando a de *green hydrogen* (2074). Este dado sugere que *hydrogen production* é um termo central, frequentemente co-ocorrendo com uma vasta gama de outros conceitos, indicando que a discussão sobre o processo de produção em si é transversal e fundamental para diversas sub áreas do campo, como a eletrólise alimentada por energias renováveis. *Hydrogen isolated* (75 ocorrências, 1159 força do link) complementa essa centralidade, atuando como um termo genérico, mas essencial para o tema.

A presença significativa de termos ligados a fontes de energia renováveis sublinha a estreita conexão entre a produção de HV e a geração de energia limpa. *Renewable energy* (76 ocorrências, 1020 força de interação), *renewable energies* (63 ocorrências, 923 força de interação) e *solar power generation* (73 ocorrências, 1088 força de interação) são proeminentes, confirmando a ênfase da literatura na utilização dessas fontes para descarbonizar a produção de hidrogênio. Essa tendência é amplamente reconhecida, visto que a eletricidade de fontes renováveis é o principal insumo para a produção de hidrogênio verdadeiramente verde (Hassan et al., 2023). O termo *hydrogen storage* (73 ocorrências, 1084 força de interação) também se mostra relevante, indicando que, além da produção, os desafios e soluções para o armazenamento do hidrogênio são um foco importante da pesquisa, dada sua

criticidade para a viabilidade e integração do hidrogênio na cadeia de valor energética (Singh et al., 2024).

Além dos aspectos técnicos e energéticos, a inclusão de *economic analysis* com 52 ocorrências e 809 de força de interação, e *carbon dioxide* com 48 ocorrências e 772 de força de interação, aponta para a multidimensionalidade da pesquisa. A *economic analysis* reflete a preocupação com a viabilidade financeira e a competitividade do HV, um fator crucial para sua implementação em larga escala, conforme discutido em diversas avaliações técnico-econômicas (Martins et al., 2024). Já a presença de *carbon dioxide* enfatiza o papel do HV como vetor de descarbonização, ligando a produção de energia à mitigação das mudanças climáticas e à redução de emissões. A relevância desses termos sugere que a literatura não se restringe apenas à engenharia de processos, mas também abrange as implicações econômicas e ambientais da transição energética. A ausência de termos explicitamente relacionados à "simbiose industrial" entre as palavras-chave de maior ocorrência e força de interação na presente análise, apesar de ser um foco central desta dissertação, pode indicar que a intersecção específica entre HV e SI é um campo emergente ou que os termos utilizados para descrevê-la são mais dispersos e menos padronizados na literatura principal sobre hidrogênio. Este cenário reforça a relevância e o caráter exploratório deste estudo em conectar esses dois campos, buscando preencher uma lacuna de conhecimento.

4.1.4. Desempenho por periódico

A Tabela 7 apresentada lista as 10 revistas científicas com maior número de publicações, citações e fator de impacto na área de SI e HV.

Tabela 7 - Número de artigos, citações e fator de impacto dos principais periódicos com base no resultado da pesquisa das palavras-chave

Periódico	Nº de artigos	Citações	Fator de impacto	Editora
1. International Journal Of Hydrogen Energy	71	1029	8.1	Elsevier Ltd.
2. Energies	33	221	3.5	MDPI AG
3. Energy Conversion And Management	15	392	7.0	Elsevier Ltd.
4. Energy	11	177	10	Elsevier (Pergamon)
5. Journal Of Cleaner Production	10	130	11.1	Elsevier Ltd.
6. Applied Energy	9	137	10.2	Elsevier B.V.
7. Renewable Energy	9	97	12.1	Elsevier Ltd.
8. Journal Of Energy Storage	8	96	13.9	Elsevier B.V.
9. Fuel	7	39	6.5	Elsevier Ltd. (geralmente)
10. Renewable And Sustainable Energy Reviews	7	80	15.4	Elsevier Ltd.

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A análise dos periódicos identificados por meio da pesquisa com palavras-chave revela uma correlação positiva entre o número de publicações e o número de citações, sugerindo que revistas com maior volume de artigos tendem a ter maior visibilidade e impacto na comunidade científica. No entanto, tal correlação não se mantém de forma linear em relação ao fator de impacto. Este último parece estar mais

relacionado à qualidade, profundidade metodológica e relevância temática dos artigos publicados do que ao volume de publicações em si.

O *International Journal of Hydrogen Energy* ocupa posição de destaque, liderando tanto em número de publicações (71) quanto em citações (1.029), com um fator de impacto de 8,1. Isso confirma seu papel central na consolidação do HV como campo emergente de pesquisa científica. Este resultado está alinhado com a análise realizada por Borges et al. (2024), que também identificaram essa revista como a principal fonte de produção científica sobre o tema, reafirmando seu papel como veículo consolidado na disseminação de conhecimento técnico-científico sobre HV.

A revista *Energies* aparece na segunda posição, com 33 artigos e 221 citações. Apesar do fator de impacto relativamente baixo (3,5), sua ampla cobertura temática permite a inserção de estudos interdisciplinares, incluindo aqueles relacionados à SI e ao HV. Essa presença evidencia que as discussões sobre novas matrizes energéticas sustentáveis estão sendo integradas a abordagens mais amplas de desenvolvimento tecnológico e ambiental.

A *Energy Conversion and Management*, com apenas 15 publicações, demonstra alto desempenho com 392 citações e fator de impacto de 7,0. O foco da revista em eficiência energética e tecnologias de conversão reforça sua relevância para pesquisas que buscam integrar o HV a sistemas produtivos mais eficientes. A elevada média de citações por artigo sugere a publicação de trabalhos com grande importância científica.

Outros periódicos de destaque, como o *Journal of Cleaner Production* (fator de impacto 11,1) e o *Journal of Energy Storage* (13,9), mesmo com menor número de publicações, apresentam indicadores de impacto científico muito elevados. Esses dados reforçam a importância de periódicos especializados, nos quais a qualidade editorial e a relevância temática contribuem de forma decisiva para a valorização dos estudos publicados.

É possível confirmar que o fator de impacto é um indicador mais sensível à influência e qualidade de uma revista do que o número absoluto de publicações. Além disso, observa-se um crescimento consistente no interesse por estudos voltados à SI e ao HV, com indicativos claros de que essas áreas estão em ascensão e cada vez

mais interligadas. A presença recorrente desses temas em periódicos de alto impacto sugere que ambos vêm ganhando espaço na agenda científica internacional, consolidando-se como campos estratégicos para a transição energética e para a reconfiguração de modelos produtivos sustentáveis.

Uma análise comparativa com o estudo de Artisyasa, Mardiyana e Islami (2024) revela uma notável similaridade nos resultados. A pesquisa dos autores também aponta o *International Journal of Hydrogen Energy* como a principal fonte de publicações, seguido por periódicos como *Energies*, *Journal of Cleaner Production* e *Energy Conversion and Management*, que também figuram com destaque no presente levantamento. A repetição desses mesmos periódicos em diferentes análises bibliométricas indica a existência de um núcleo consolidado de revistas científicas que centralizam e impulsionam o debate global sobre HV, funcionando como os principais canais para a disseminação de inovações e tendências na área.

4.2. Análise de rede

Chu et al. (2022) observaram que a análise de redes é uma ferramenta importante para entender as interconexões e padrões de relacionamento entre os elementos de um conjunto de dados, como coautoria e autores, países e palavras-chave e paralelamente é importante analisar os clusters gerados pelo Software.

No estudo realizado por Zupic e Cater (2015), a análise de *cluster* é enfatizada. A análise de cluster em um mapa de rede consiste em identificar agrupamentos de elementos interconectados com base em seus relacionamentos e proximidade. Cada *cluster* representa um conjunto de elementos que são mais fortemente relacionados entre si do que com elementos de outros *clusters*. O tamanho de um cluster em um mapa de rede indica a densidade de conexões entre os elementos que o compõem. Quanto maior o tamanho do *cluster*, maior a densidade de conexões internas, sugerindo uma forte coesão e inter-relação entre os elementos.

Usando o VOSviewer, foram gerados três mapas de rede relacionados à coautoria de autores e países e à coocorrência de palavras-chave. A Figura 7 mostra a rede de colaboração entre autores.

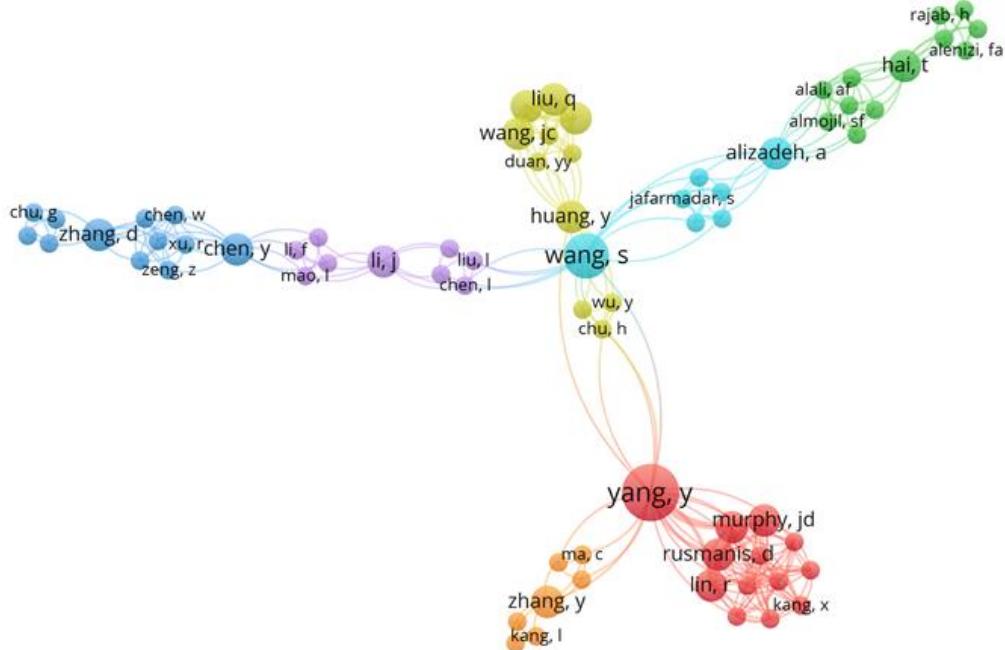


Figura 7. Rede de colaboração entre autores. Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

A rede de colaboração apresentada reflete a interação entre vários grupos de pesquisa trabalhando na produção de HV e sua aplicação dentro do conceito de SI. A análise de rede revela que a pesquisa neste campo é caracterizada por um alto nível de colaboração, com diferentes *clusters* representando grupos de pesquisadores que compartilham interesses semelhantes e frequentemente publicam juntos. Os *clusters* identificados na rede são diferenciados por cores e refletem subtemas ou abordagens específicas dentro do campo de estudo. Cada *cluster* inclui autores com maior conectividade dentro de suas redes, indicando uma maior frequência de coautoria ou colaboração em projetos científicos e publicações. Por exemplo:

- *Cluster Vermelho* (Yang Y e principais colaboradores): Este é o maior *cluster* e representa uma rede central de autores com contribuições significativas que conectam clusters menores. A predominância de Yang Y sugere que este autor lidera estudos que influenciam amplamente o campo, integrando várias abordagens, como análises de eficiência energética e estudos técnicos relacionados ao HV. Um dos estudos notáveis de Yang Y, *Roadmap to hybrid offshore system with hydrogen and*

power co-generation (explora a integração da produção de hidrogênio e cogeração de energia em sistemas *offshore*). Esta pesquisa fornece uma estrutura abrangente para otimizar o uso de recursos de energia renovável em ambientes offshore, melhorando assim a eficiência energética e reduzindo as emissões de carbono. A alta densidade de conexões neste cluster indica uma colaboração extensa e diversificada que tem uma profunda influência na pesquisa no campo.

- *Cluster azul* (Chen Y, Zhang D e principais colaboradores): Este grupo se destaca por abordar processos específicos, como o uso de materiais para captura e armazenamento de carbono aplicados à produção de hidrogênio. As conexões entre os autores sugerem um foco técnico, com forte ênfase na melhoria de processos industriais relacionados à sustentabilidade. As contribuições de Chen YD incluem o estudo *Optimal sizing for a wind-photovoltaic-hydrogen hybrid system considering the leveled cost of storage and source-load interaction* (Dimensionamento ótimo para um sistema híbrido eólico-fotovoltaico-hidrogênio considerando o custo nivelado de armazenamento e a interação fonte-carga) que se aprofunda na otimização de sistemas híbridos que combinam energia eólica e solar com produção de hidrogênio. Esta pesquisa destaca as principais inovações para equilibrar a oferta e a demanda de energia, minimizando os custos, o que é essencial para a produção de hidrogênio em escala industrial. Zhang D contribuiu com o estudo *Machine learning-based techno-economic-environmental analysis of CO₂ to olefins process for screening of optimal catalyst and hydrogen color* (Análise técnico-econômica-ambiental baseada em aprendizado de máquina do processo de conversão de CO₂ em olefinas para triagem de catalisador e corante de hidrogênio ideais). A contribuição desta pesquisa é fornecer uma metodologia integrada que acelera a transição para uma economia circular, transformando CO₂ em produtos químicos valiosos, promovendo uma abordagem sustentável. A análise das cores do hidrogênio ajuda a equilibrar custos e impactos ambientais, enquanto o uso do aprendizado de máquina revoluciona a maneira como as tecnologias emergentes são otimizadas.

- *Cluster verde* (Alizadeh A e colaboradores): Este *cluster* reflete pesquisas focadas no desenvolvimento de tecnologias inovadoras, particularmente em países emergentes ou regiões com alto potencial para produção de HV. Alizadeh A aparece como uma figura central, indicando liderança em pesquisas relacionadas à otimização de processos e estudos de viabilidade econômica. Um exemplo notável é o estudo de

Alizadeh, *Numerical assessment of a hybrid energy system based on solid oxide electrolyzer, solar energy and molten carbonate fuel cell for the generation of electrical energy and hydrogen fuel with electricity storage option* (Avaliação numérica de um sistema híbrido de energia baseado em eletrólito de óxido sólido, energia solar e célula a combustível de carbonato fundido para geração de energia elétrica e combustível de hidrogênio com opção de armazenamento de eletricidade), que investiga sistemas híbridos combinando eletrolisadores de óxido sólido, energia solar e células de combustível de carbonato fundido. Este trabalho fornece percepções valiosas para melhorar a eficiência da geração de hidrogênio e energia ao mesmo tempo em que incorpora o armazenamento de eletricidade, mostrando como as tecnologias híbridas podem otimizar o uso de energia renovável.

- *Cluster Amarelo* (Wang S e Liu Q): Este grupo parece explorar aspectos ergonômicos e metodológicos da produção de hidrogênio, com foco na otimização de ferramentas e equipamentos usados em processos industriais. Wang S publicou trabalhos notáveis como *Optimal Scheduling of Integrated Energy Network with Electricity-Hydrogen-Storage Considering Ladder Carbon Trading Mechanism* (Programação Ótima de Rede Energética Integrada com Armazenamento de Eletricidade-Hidrogênio Considerando Mecanismo de Negociação de Carbono em Escada), que discute a integração do armazenamento de hidrogênio em redes de energia, destacando o papel das políticas de comércio de carbono na melhoria da eficiência do sistema. Da mesma forma, o trabalho de Liu Q, *A multi-dimensional feasibility analysis of coal to methanol assisted by green hydrogen from a life cycle viewpoint* (Uma análise de viabilidade multidimensional da conversão de carvão em metanol assistida por hidrogênio verde do ponto de vista do ciclo de vida) fornece insights críticos sobre os benefícios ambientais e econômicos da integração do hidrogênio verde em processos industriais como a produção de metanol, ressaltando a importância das avaliações do ciclo de vida para a tomada de decisões políticas e industriais.

- *Cluster laranja* (Murphy JD e colaboradores): Este *cluster* é notável por integrar abordagens práticas e estudos de caso relacionados à implementação de SI. Os autores deste grupo examinam frequentemente os impactos socioeconômicos e ambientais de tecnologias associadas ao HV. Por exemplo, o estudo de Murphy JD *Electrofuels in a circular economy: A systems approach towards net zero*

(Eletrocombustíveis em uma economia circular: uma abordagem sistêmica rumo ao zero líquido), foca no uso de eletrocombustíveis, produzidos com hidrogênio verde, em estruturas de EC. Esta pesquisa fornece orientação prática para atingir emissões líquidas zero, ao mesmo tempo em que alavanca as sinergias entre sistemas de energia e gerenciamento de resíduos.

Além disso, a análise mostra que o número de publicações não está diretamente relacionado à posição central dentro da rede de colaboração. Enquanto autores como Barhoumi, Okonkwo e Nadaleti lideram em volume de publicação (conforme mostrado na Tabela 3), autores como Yang Y, Wang S, Huang Y e Alizadeh A se destacam devido à densidade de conexões dentro de seus *clusters*. Isso indica que as contribuições científicas destes últimos vão além do número de trabalhos publicados, desempenhando um papel crucial na disseminação do conhecimento e no avanço colaborativo no campo. Por exemplo, os trabalhos de Wang S conectam metodologias teóricas com aplicações práticas, enquanto as contribuições de Liu Q fornecem uma perspectiva multidimensional sobre a viabilidade econômica e ambiental de processos industriais assistidos por HV.

Além disso, a presença de Alizadeh A e Wang S como figuras centrais em seus respectivos *clusters* destaca sua capacidade de promover a colaboração entre diferentes grupos de pesquisa. O trabalho de Alizadeh A tem sido fundamental para unir pesquisa teórica e aplicações práticas, conforme demonstrado em estudos relacionados a sistemas de energia híbrida integrando fontes de energia renováveis, enquanto Wang S contribuiu para a integração de estruturas metodológicas em diversos contextos industriais.

Por fim, a rede de colaboração demonstra que, embora a pesquisa sobre HV seja relativamente concentrada entre alguns grupos, há uma tendência crescente de integração entre diferentes clusters. Isso reforça a natureza interdisciplinar e global da pesquisa nessa área, enfatizando ainda mais a necessidade de esforços colaborativos para abordar os desafios multifacetados da produção de HV. A análise da coautoria dos países nos permite entender as relações internacionais na produção científica, identificando quais nações estão mais envolvidas em certas áreas de pesquisa e como elas se relacionam entre si. A Figura 8 mostra a rede de colaboração entre os países.

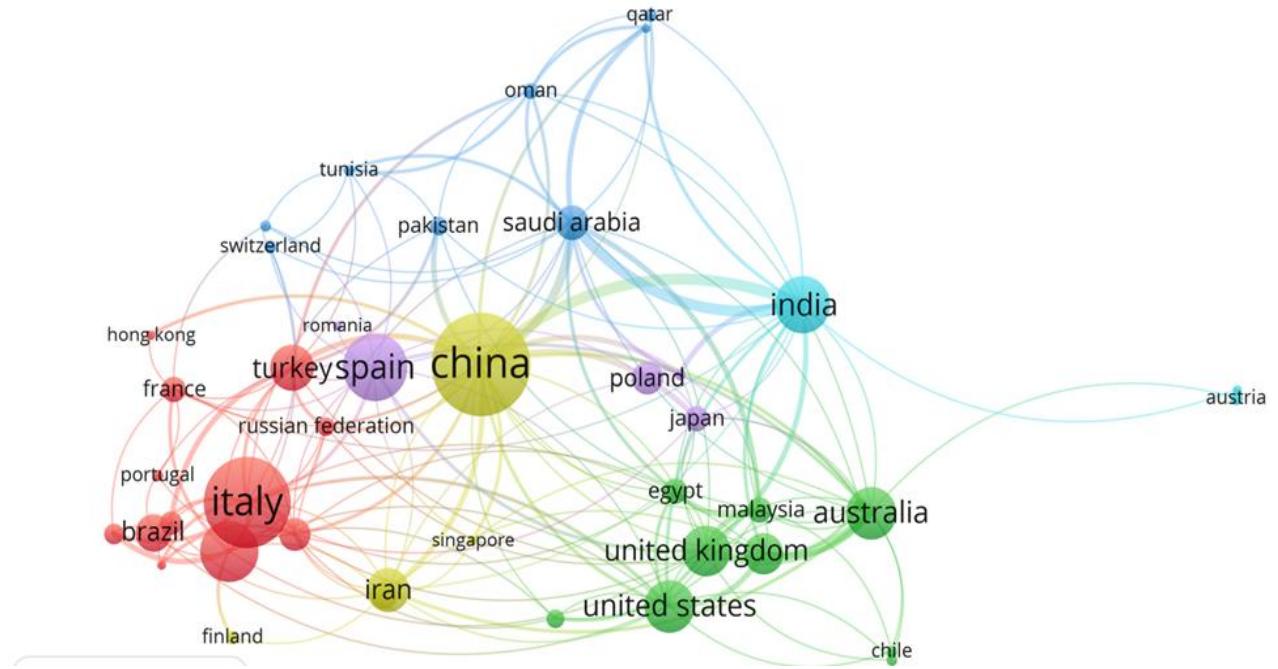


Figura 8. Rede de colaboração entre países. Fonte: Elaborado pelo Autor (2024).

A rede de colaboração mostrada na imagem destaca a interconexão global de países envolvidos em pesquisas de SI e HV. A rede é construída com base na coautoria de publicações científicas, onde as linhas representam colaborações entre países. Países com maior número de conexões, como China, Estados Unidos, Itália, Índia e Alemanha, são atores centrais neste campo sendo um comportamento semelhante é observado em Jaradat et al. (2024). Essas nações demonstram liderança no avanço da pesquisa de SI e HV, refletindo seu papel fundamental nos esforços colaborativos globais. A rede é dividida em clusters, cada um identificado por uma cor distinta. Esses *clusters* representam agrupamentos regionais ou temáticos específicos de colaborações de pesquisa, que podem ser analisados para entender suas contribuições únicas para o campo. Fernandez-Arias et al. 2024, que discute a geração de tecnologias para HV, por meio de uma revisão bibliométrica, encontra resultados paralelos com clusters que têm características semelhantes, como China, Estados Unidos, Itália, Índia e Reino Unido, que também têm destaque em seus clusters. Analisando os resultados da Figura 8 sobre os *clusters*, podemos concluir:

- *Cluster Vermelho* (por exemplo, Itália, Brasil, Espanha, Turquia): Este *cluster* destaca as contribuições de países europeus e sul-americanos, particularmente Itália e Brasil, que se concentram na integração de conceitos de SI com sistemas de energia

renovável. O papel da Itália é proeminente na exploração de abordagens de EC e estratégias de descarbonização, enquanto o Brasil traz considerações sobre a produção de hidrogênio de base renovável, alavancando seus abundantes recursos de biomassa e energia eólica. Espanha e Turquia também contribuem significativamente, especialmente na aplicação de estratégias de SI para aumentar a eficiência de recursos na produção de hidrogênio.

- *Cluster Amarelo* (por exemplo, China, Irã): Este *cluster* representa o papel dominante da China na pesquisa de HV, apoiado por sua forte ênfase em inovação tecnológica e projetos de energia renovável em larga escala. Colaborações com países como o Irã sugerem um foco em métodos de produção de hidrogênio de baixo custo e soluções de energia escaláveis, abordando os desafios de regiões de alta demanda de energia.

- *Cluster verde* (por exemplo, Estados Unidos, Reino Unido, Austrália): Este grupo apresenta países que são líderes em tecnologias avançadas de hidrogênio e estruturas de políticas para o desenvolvimento sustentável. Os Estados Unidos contribuem por meio de pesquisas de ponta sobre armazenamento de hidrogênio, transporte e viabilidade econômica, enquanto o Reino Unido se concentra na integração de políticas e no desenvolvimento de infraestrutura de hidrogênio verde. A Austrália desempenha um papel fundamental na exploração do potencial de exportação de hidrogênio, alavancando seus recursos naturais solares e eólicos.

- *Cluster azul* (por exemplo, Índia, Arábia Saudita): Este *cluster* mostra as contribuições de economias emergentes como a Índia e a Arábia Saudita. A pesquisa da Índia é motivada por sua necessidade de soluções de hidrogênio de baixo carbono e acessíveis, abordando desafios de energia doméstica enquanto promove práticas de SI. A Arábia Saudita, com seus investimentos substanciais em energia verde, está emergindo como um player-chave nos mercados de exportação de hidrogênio.

- *Cluster roxo* (por exemplo, Polônia, Japão): Os países neste cluster focam em tecnologias de nicho e aplicações especializadas de hidrogênio verde. Por exemplo, o Japão é líder no desenvolvimento de células de combustível e na exploração do papel do hidrogênio no setor de transporte, enquanto a Polônia investiga a integração do hidrogênio em processos industriais e seu papel potencial na segurança energética.

A participação de países emergentes, como Brasil e Índia, é particularmente significativa, pois expande a diversidade geográfica e temática da pesquisa. Conforme observado por Neves et al., 2020, essas nações frequentemente abordam desafios localizados ao mesmo tempo em que contribuem para avanços globais em SI e HV. Por exemplo, o foco do Brasil na integração de energia renovável com a produção de hidrogênio se alinha com seus abundantes recursos naturais, enquanto as contribuições da Índia visam soluções econômicas para suas crescentes necessidades energéticas.

A estrutura colaborativa está alinhada com as descobertas de Panchenko et al., 2023 que identificou os Estados Unidos, China, Itália, Alemanha e Índia como os países mais ativos em pesquisa de SI e HV. Essas nações não apenas lideram na produção de publicações, mas também promovem parcerias significativas, criando uma densa rede de troca de conhecimento. Essas colaborações são essenciais para abordar os desafios interdisciplinares impostos pela produção de hidrogênio e sua integração em sistemas de SI.

A rede retratada na Figura 8 é um instantâneo da pesquisa em um dado momento, e espera-se que evolua conforme novos países se unam e as colaborações existentes se aprofundem. Economias emergentes provavelmente desempenharão um papel mais proeminente, contribuindo com abordagens inovadoras adaptadas às suas necessidades e contextos específicos. Essa natureza dinâmica destaca a importância de promover parcerias globais para acelerar o desenvolvimento de tecnologias de HV e sua aplicação em SI.

A análise de rede demonstra que a pesquisa sobre SI e HV é interdisciplinar e altamente colaborativa, envolvendo uma mistura de nações líderes e participantes emergentes. Os *clusters* identificados destacam prioridades regionais distintas e focos tecnológicos, contribuindo coletivamente para o avanço da produção sustentável de hidrogênio. Este esforço global ressalta a necessidade de cooperação internacional contínua para superar desafios e maximizar os benefícios do HV dentro da estrutura da SI.

A rede de coocorrência de palavras-chave possibilita identificar quais termos são frequentemente associados, formando agrupamentos ou clusters temáticos. Esses clusters representam áreas de interesse ou temas dominantes na pesquisa,

permitindo uma compreensão mais profunda das interconexões entre diferentes conceitos e temas. A Figura 9 demonstra a rede de coocorrência entre palavras-chave.

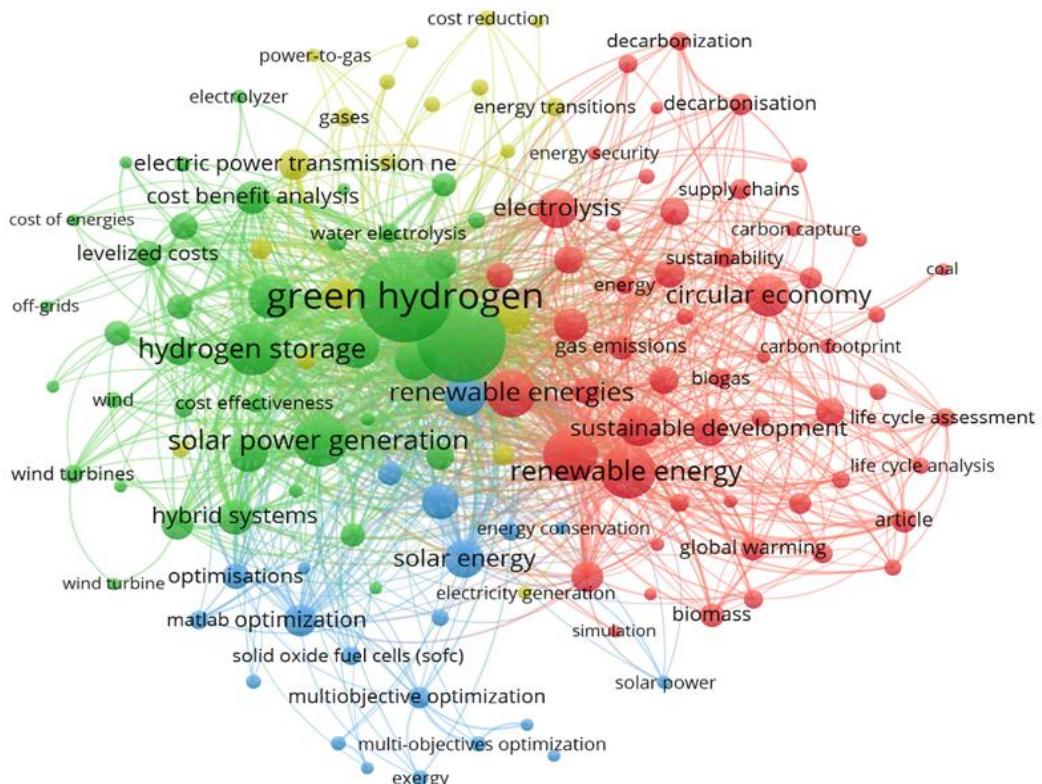


Figura 9. Rede de coocorrência de palavras-chave. Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

A rede de coocorrência de palavras-chave fornece percepções valiosas sobre tendências de pesquisa relacionadas a SI e HV. Uma característica notável dos resultados descritos na Figura 9 é a conexão entre termos associados ao desenvolvimento de HV e aqueles vinculados a SI, indicando uma interação modesta, mas identificável, entre esses dois conceitos. Raman et al. (2022), por exemplo, focam principalmente no cenário de HV com uma abordagem mais ampla e genérica. Suas descobertas destacam palavras-chave que ocorrem com frequência, como armazenamento de hidrogênio, HV, energia renovável e emissões de gases de efeito estufa. No entanto, termos diretamente associados a SI estão notavelmente ausentes, destacando que a ligação entre esses dois conceitos ainda não surgiu de forma proeminente no contexto de pesquisa mais amplo. Um padrão semelhante é

observado em estudos que focam exclusivamente em SI ou campos relacionados, como a análise bibliométrica de Alka et al. (2024), que foca na EC sem integrar termos relevantes para HV.

A análise de rede na Figura 9 revela que a pesquisa neste domínio se concentra predominantemente em conceitos como EC, HV, eletrólise, recursos renováveis e armazenamento de hidrogênio. Essas palavras-chave formam uma rede de interconexões significativas, criando clusters densos que sinalizam um foco crescente e interesse emergente nessas áreas de pesquisa. Essa interpretação é reforçada por uma análise aprofundada dos artigos vinculados a essas palavras-chave, oferecendo uma compreensão mais clara dos segmentos de pesquisa específicos onde esses termos aparecem com frequência. Além disso, a visualização destaca clusters-chave de palavras-chave interconectadas, cada uma representando domínios de interesse distintos, mas inter-relacionados, dentro do escopo mais amplo do campo que são representados por cores diferentes

- *Cluster verde: HV e Tecnologias Associadas:* Este é o maior e mais densamente conectado cluster, com *green hydrogen* (Hidrogênio verde) em seu núcleo, refletindo o foco predominante dos esforços de pesquisa. Palavras-chave adjacentes como *hydrogen storage* (armazenamento de hidrogênio), *eletrólisador* (eletrolisador), *solar power Generation* (Geração de energia solar), *hybrid systems* (Sistemas híbridos) e *power-to-gas* sugerem que os estudos são centrados no desenvolvimento de tecnologias para a produção, armazenamento e utilização de hidrogênio verde. Termos como *levelized costs* (custos nivelados) e *cost-benefit analysis* (análise de custo benefício) ressaltam uma preocupação significativa com a viabilidade econômica e análise de custos das tecnologias envolvidas. As conexões com *wind turbines* (Turninas eólicas) e *solar energy* (energia solar) destacam a integração de fontes de energia renováveis na produção de HV, reforçando a tendência em direção à inovação tecnológica e sustentabilidade.

- *Cluster Vermelho: EC e Sustentabilidade:* O segundo *cluster* mais relevante é centrado em palavras-chave como *circular economy* (Economia circular), *Sustainability* (Sustentabilidade), e *Renewable energy* (Energia renovável). Esse agrupamento reflete um interesse crescente em aplicar conceitos de economia circular ao uso de HV, com foco na redução de GEE ("emissões de gases") e impactos

ambientais ("pegada de carbono"). Palavras-chave como *biomass* (biomassa), *carbon capture* (Captura de carbono) e *life cycle assessment* (ACV) destacam a importância das avaliações do ciclo de vida e estratégias para minimizar os impactos ambientais ao longo da cadeia de valor do HV.

- *Cluster azul*: otimização e simulação: O cluster azul apresenta palavras-chave como *multiobjective optimization* (Otimizaao multiobjetivo), *simulation* (Simulação), *matlab optimization* (Otimização Mattlab) e *exergy* (Exergia). Este *cluster* indica um foco em ferramentas computacionais e métodos de otimização aplicados à produção de HV. O uso de simulações para maximizar a eficiência energética e econômica das tecnologias surge como uma área crítica de pesquisa.

A palavra-chave "hidrogênio verde" domina a rede, confirmando seu papel central na pesquisa atual. A densa conectividade do *cluster* verde reflete a importância do desenvolvimento tecnológico e econômico no avanço da produção de HV. Embora o termo "simbiose industrial" não esteja explicitamente presente, conceitos relacionados como "sistemas híbridos" e "economia circular" sugerem conexões indiretas com esse tema, sinalizando oportunidades para exploração posterior.

A integração de energia renovável, particularmente energia solar, na produção de HV é proeminente enfatizada. Além disso, as conexões entre *clusters* sugerem que a combinação de princípios de EC, ferramentas de otimização e integração de energia renovável representa uma tendência fundamental no avanço da pesquisa sobre HV. Esta análise da rede de coocorrência fornece insights críticos para identificar tendências e lacunas de pesquisa emergentes, especialmente na ligação da simbiose industrial mais explicitamente com a produção de hidrogênio verde.

Outra perspectiva para o entendimento do estado da arte atual é a rede de citação em que analisa quais documentos são mais citados, indicando sua influência e relevância na área. A Figura 10 demonstra a rede de citação obtida para as fontes de artigos.

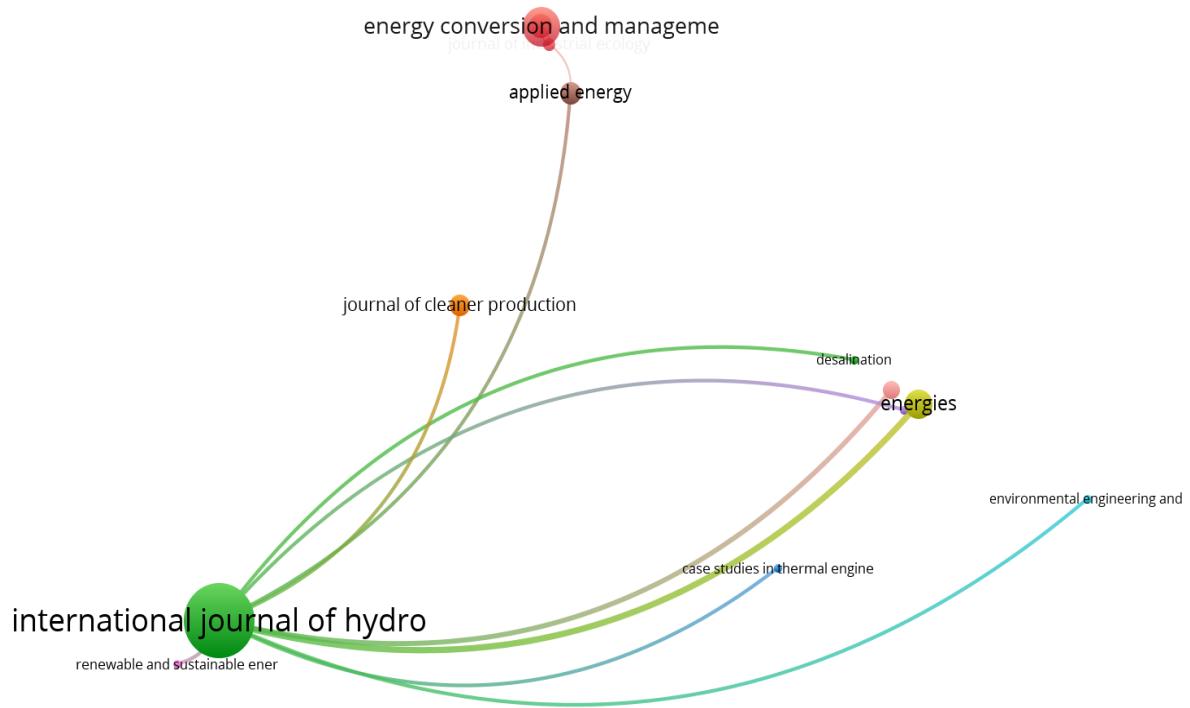


Figura 10. Rede de colaboração de periódicos. Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

A imagem gerada pelo VOSviewer apresenta uma rede bibliométrica de periódicos, revelando padrões de colaboração e inter-referência em pesquisas que abordam o HV e a SI. Esta análise detalhada dos *clusters* coloridos permite identificar subtemas e a natureza interdisciplinar do campo, conforme a metodologia de análise de trajetória tecnológica.

- O *cluster* verde, dominado pelo *International Journal of Hydrogen Energy*, emerge como o núcleo central da rede. Este periódico, conforme corroborado por estudos como o de Fernández-Arias et al. (2024), é uma referência fundamental no campo do hidrogênio, indicando uma forte concentração de pesquisas sobre a produção, armazenamento e aplicação do hidrogênio. A espessura das conexões que partem deste *cluster* para outros periódicos, como *Applied Energy* e *Energy Conversion and Management*, sugere uma intensa troca de conhecimento e referências, consolidando o *International Journal of Hydrogen Energy* como um epicentro para a disseminação de avanços e discussões no domínio. A presença de *Renewable and Sustainable Energy Reviews* neste mesmo cluster verde reforça a

orientação para a sustentabilidade e a viabilidade a longo prazo das soluções de hidrogênio.

- O *cluster* laranja, representado principalmente pelo *Journal of Cleaner Production*, destaca a dimensão da sustentabilidade e da produção limpa na rede. A inclusão deste periódico, reconhecido por Chertow et al. (2021) como central no campo da SI, sublinha a preocupação com os impactos ambientais e a eficiência de recursos dentro do contexto da simbiose. A conexão entre este cluster e o *International Journal of Hydrogen Energy* demonstra que a pesquisa em hidrogênio verde está intrinsecamente ligada a princípios de sustentabilidade e otimização de processos industriais, buscando soluções que minimizem resíduos e maximizem a eficiência.
- O *cluster* vermelho, que inclui *Applied Energy* e *Energy Conversion and Management*, reflete um foco significativo na eficiência energética e na gestão de sistemas de energia. Estes periódicos são frequentemente citados em conjunto com o *International Journal of Hydrogen Energy*, indicando que a viabilidade do HV é amplamente estudada sob a ótica da otimização energética e da integração em sistemas complexos. As pesquisas neste cluster provavelmente abordam a engenharia de sistemas, a modelagem de processos e a análise de desempenho de tecnologias de hidrogênio, com ênfase na sua aplicação prática e na gestão de energia.
- O *cluster* roxo, que abrange periódicos como *Desalination* e *Energies*, sugere uma vertente de pesquisa voltada para a obtenção de água para a produção de hidrogênio e para o uso do hidrogênio em contextos energéticos mais amplos. A presença de *Desalination* indica a relevância da dessalinização como método para obter água pura, essencial para a eletrólise do hidrogênio, especialmente em regiões com escassez hídrica. *Energies*, por sua vez, reforça a conexão do hidrogênio com o setor de energias renováveis e a eficiência energética, explorando a integração do hidrogênio em diversas fontes de energia.

Finalmente, o *cluster* azul claro, com *Environmental Engineering and Management*, aponta para a importância dos aspectos ambientais e de engenharia no gerenciamento de projetos de HV e SI. Este *cluster* provavelmente aborda temas como ACV, tratamento de efluentes, e o impacto ambiental das tecnologias de hidrogênio, garantindo que o desenvolvimento seja ecologicamente responsável. A conexão com o *International Journal of Hydrogen Energy* e *Energies* sugere que a

dimensão ambiental é uma consideração transversal e fundamental em todas as etapas da pesquisa e implementação do HV.

Em síntese, a rede bibliométrica ilustra a natureza multifacetada e interdisciplinar da pesquisa em HV e SI. A centralidade do *International Journal of Hydrogen Energy* e a interconexão dos diversos clusters demonstram uma comunidade científica robusta e colaborativa, que explora desde a produção e eficiência energética até os desafios de sustentabilidade e gestão ambiental, consolidando o conhecimento necessário para o avanço dessas tecnologias.

4.3. Elaboração do *roadmap* tecnológico

A Elaboração do *roadmap* tecnológico se deu a partir de uma base de conhecimento sólida, que integrou os resultados da revisão bibliométrica inicial e uma pesquisa direcionada de documentos complementares. Essa pesquisa resultou na seleção final de 21 patentes e 14 artigos, que foram analisados em profundidade. O principal objetivo desta fase foi compreender em detalhes as características, as tecnologias aplicadas e as matérias-primas utilizadas na produção de HV a partir de fontes renováveis, fornecendo o subsídio necessário para a elaboração do *roadmap*.

Para organizar e construir o *roadmap* com todas as informações coletadas, foram criadas taxonomias específicas para este estudo. Elas funcionam como sistemas de classificação onde os dados extraídos dos documentos foram categorizados de forma estruturada. Essas taxonomias foram divididas em três níveis distintos, cada um oferecendo uma profundidade de análise diferente sobre o tema.

A utilização dessa estrutura de taxonomias é fundamental para a elaboração do *roadmap*. Essa abordagem sistemática ajuda a organizar o conhecimento de forma lógica e clara, permitindo identificar padrões, lacunas na pesquisa e, principalmente, visualizar possíveis tendências futuras para o desenvolvimento conjunto da produção de HV a partir de uma abordagem holística da SI. Os três níveis de análise macro, meso e micro, serão detalhados e discutidos nas próximas subseções.

4.3.1. Análise do resultado das patentes

A análise das 20 patentes selecionadas para a construção do *roadmap* tecnológico permite compreender o perfil da pesquisa e as temáticas abordadas sob uma perspectiva de inovação. A análise de patentes constitui uma ferramenta indispensável para a avaliação da maturidade tecnológica de inovações como pode ser corroborado na pesquisa de Huang et al., (2025) em que se discute a descoberta de oportunidade tecnológica baseada na análise de patentes.

Um aumento expressivo no número de patentes em uma área específica, por exemplo, pode sinalizar uma fase de rápido crescimento ou emergência tecnológica. Em contrapartida, a estabilização no número de novas patentes, acompanhada por um incremento na especificidade das reivindicações das reivindicações e na densidade das citações, sugere a transição para um estágio de maior maturidade, caracterizado por inovações incrementais, esses aspectos de pesquisas envolvendo patentes são encontradas em Seo (2022) e Linares, Paulo e Porto (2019). Dessa forma, as patentes atuam como indicadores robustos, fornecendo subsídios para a compreensão da trajetória tecnológica e o embasamento de decisões estratégicas. Para esta pesquisa a Figura 11 apresenta as 21 patentes classificadas pelo número de patentes por país.

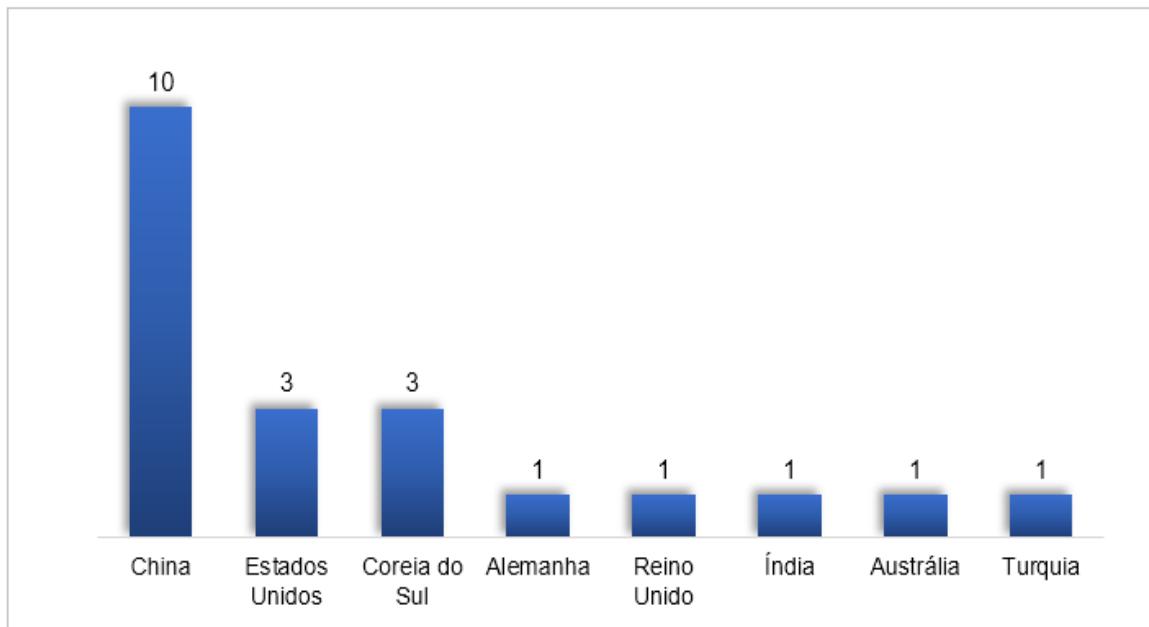


Figura 11. Número de patentes por país. Fonte: Elaborado pelo Autor (2024).

A distribuição de patentes ilustrada na Figura 11 evidencia a China como o país com o maior número de depósitos (10 patentes). Essa proeminência no cenário de patentes de eletrônica de potência relacionada ao HV alinha-se à crescente liderança global da China em tecnologias de energias renováveis e SI (Yang et al., 2023). Essa concentração significativa pode refletir um substancial investimento nacional em pesquisa e desenvolvimento dentro desse domínio tecnológico específico, potencialmente indicando um estágio mais avançado de desenvolvimento e exploração em comparação com outras regiões.

Estados Unidos e Coreia do Sul, com três patentes cada, exibem uma participação relevante, mas menos proeminente. Já Alemanha, Reino Unido, Índia, Austrália e Turquia, com apenas uma patente por país, sinalizam um engajamento mais inicial ou uma especialização em nichos específicos das tecnologias de HV. Essa concentração geográfica das patentes sugere que a inovação nesse campo, sobretudo no âmbito da SI, é impulsionada por economias com forte investimento em pesquisa e desenvolvimento de tecnologias energéticas. A disparidade no volume de patentes entre os países também pode indicar diferenças nas capacidades tecnológicas, nas prioridades estratégicas de propriedade intelectual e no estágio de

avanço do HV em cada nação. Para uma compreensão mais completa, uma análise detalhada do *status* das patentes pode revelar mais detalhes as trajetórias tecnológicas e as áreas de especialização que direcionam a inovação global nesse promissor setor. A Figura 12 apresenta a relação de patentes depositadas e concedidas por país.

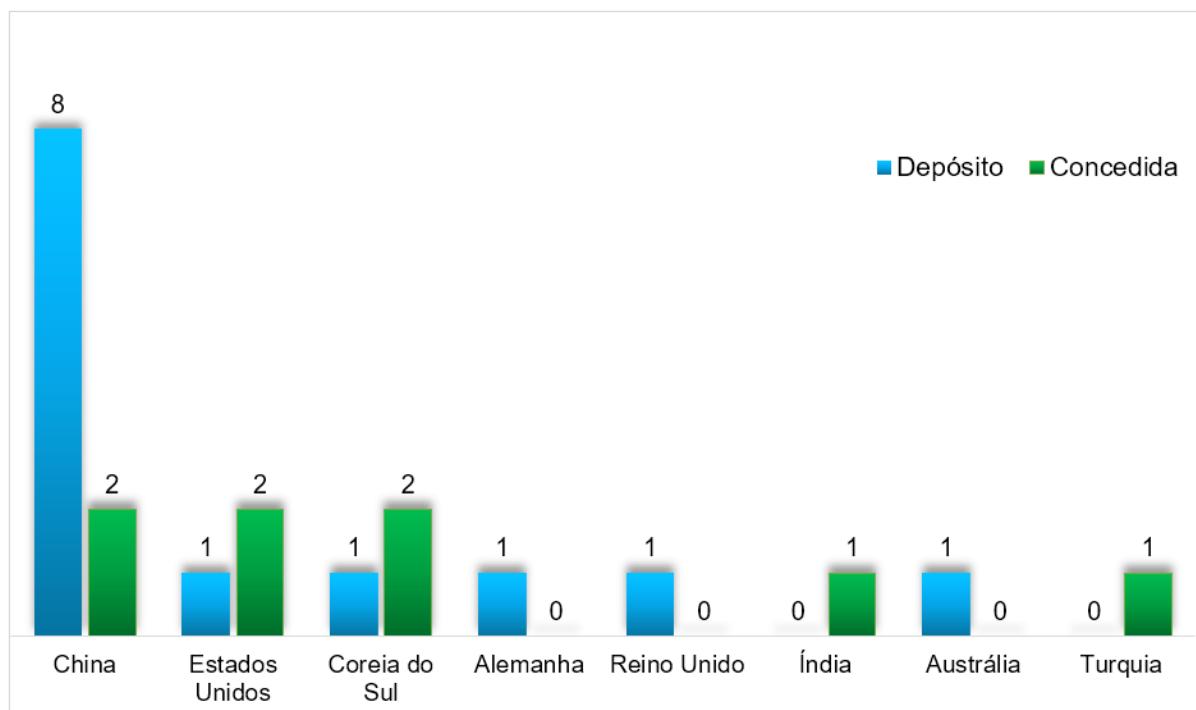


Figura 12. Número de patentes depositadas e patentes concedidas por país. Fonte: Elaborado pelo Autor (2025).

Ao analisar o *status* dessas patentes, conforme apresentado na Figura 12, observa-se uma clara predominância de solicitações sobre as patentes concedidas, indicando a natureza emergente e o dinamismo do campo das tecnologias de HV. Para a China, que lidera em volume total de depósitos, dos 8 depósitos registrados, apenas 2 foram efetivamente concedidas. Este cenário sugere uma intensa atividade de pesquisa e desenvolvimento, com um volume considerável de inovações em fase inicial de proteção, um cenário semelhante é encontrado também nas seções 4.2 e 4.1.2 em que obtém um destaque da China frente a outros países.

Para os Estados Unidos e a Coreia do Sul, os dados apresentados podem indicar uma fase relativamente inicial de maturação de seu portfólio de patentes, onde

o número de concessões já supera o de depósitos recentes na amostra específica. Isso pode sugerir que, embora haja inovação contínua, uma parte significativa das patentes concedidas pode derivar de depósitos anteriores não capturados na contagem atual, ou que o ritmo de concessões supera momentaneamente o de novas submissões para a tecnologia em foco., esse mesmo panorama é encontrado na pesquisa de Vidoni, (2023), em que o panorama das patentes de hidrogênio é dominado por países asiáticos (China e Japão), com forte contribuição dos EUA e Coreia do Sul. Índia e Turquia, embora com um número baixo de patentes em geral, possuem a sua única patente já concedida cada, o que pode indicar um foco em inovações mais consolidadas ou um processo de exame concluído para depósitos estratégicos. A predominância de patentes em fase de aplicação reflete um alto volume de inovação que ainda está em processo de revisão e concessão pelas autoridades competentes, um processo que pode levar vários anos (Arsad et al. 2023). Este cenário patenteário aponta para um estágio inicial de maturidade tecnológica para as inovações relacionadas à produção de HV e suas interfaces com a SI, onde muitas soluções ainda aguardam validação e proteção formal, evidenciando o potencial futuro de desenvolvimento e o ritmo acelerado de pesquisa no setor.

Outro aspecto pra para se analisar é referente à distribuição de patentes em relação a ser de origem acadêmica ou de empresa privada. A Figura 13 detalha o perfil das entidades responsáveis pela inovação, mostrando que empresas são as principais depositantes de patentes (14 ocorrências), superando as universidades (9 ocorrências).

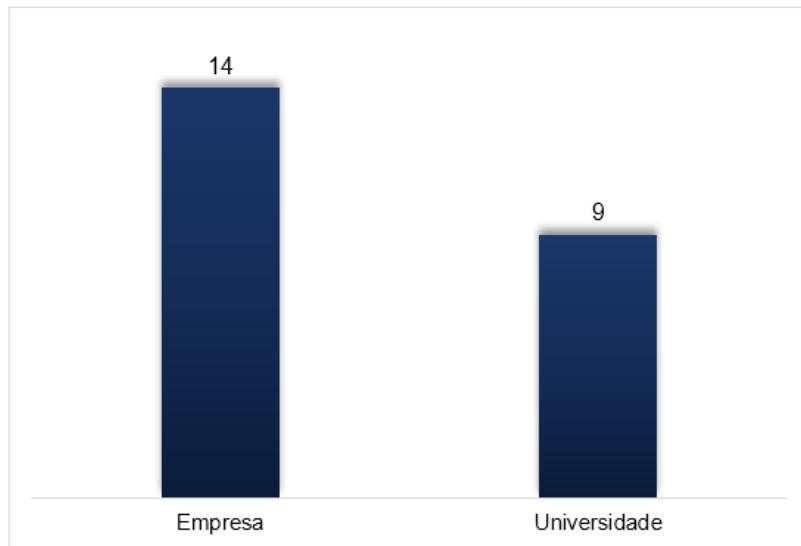


Figura 13. Distribuição das patentes por Empresas x universidades. Fonte: Elaborado pelo Autor (2025).

Essa distribuição indica que a pesquisa e o desenvolvimento no campo do HV, com ênfase na aplicação e escalabilidade (reforçando a potencialidade da SI), estão sendo predominantemente liderados por entidades do setor privado. A maior participação de empresas em atividades de patenteamento sugere um foco na proteção de inovações com vistas à comercialização e à aplicação industrial, o que é um sinal de que o campo está amadurecendo e se direcionando para soluções de mercado. Embora universidades desempenhem um papel crucial na pesquisa fundamental e na geração de conhecimento, a prevalência de patentes de empresas reforça o interesse e o investimento do setor produtivo na transição para uma economia do HV.

Para aprofundar a compreensão sobre a dinâmica de inovação em tecnologias de hidrogênio, a Tabela 8 oferece um panorama detalhado de patentes selecionadas, categorizadas por tipo de instituição, empresas e universidades e pelo seu status no processo de proteção da propriedade intelectual, ou seja, se são patentes solicitadas ou já concedidas.

Tabela 8 – Panorama de patentes em tecnologias de hidrogênio: Distribuição por tipo de Instituição, País e status da proteção

Instituição	Tipo de instituição	País	Status da Patente	Código da Patente
Sinopec shanghai petroquímica co ltd (sinopec) / china petroleum & chem corp (snpcc)	Empresa	China	Depositada	CN117926275-A
Haidriver shanghai energy technology co	Empresa	China	Depositada	CN114362145-A
Hualu eng & technology co ltd	Empresa	China	Concedida	CN113964925-B
Biox co ltd kolon global corp.	Empresa	Coreia do Sul	Concedida	KR2592950-B1
Siemens gamesa renewable energy	Empresa	Alemanha	Depositada	WO2024146715-A1
Shaanxi huaqin new energy technology co	Empresa	China	Depositada	CN118207558-A
Halliburton energy services inc	Empresa	Estados Unidos	Concedida	US11548782-B1
Zerova ltd	Empresa	Reino Unido	Concedida	GB2620780-B1
Natural ocean well co	Empresa	Austrália	Depositada	AU2022405278-A1
Wison eng china co ltd	Empresa	China	Depositada	CN113930258-A
Jiangsu jinweixing energy technology co	Empresa	China	Concedida	CN115637446-B
Korea hydro & nuclear power co lte	Empresa	Coreia do Sul	Concedida	KR2696744-B1
Univ beijing jiaotong	Universidade	China	Depositada	CN115140845-A
Univ michigan	Universidade	Estados Unidos	Depositada	WO202324124-A1
Univ xiamen	Universidade	China	Depositada	CN118292013-A
Indian inst technology bombay	Universidade	Índia	Concedida	IN538874-B
Univ yeungnam res coop found	Universidade	Coreia do Sul	Depositada	KR2023045662-A
Univ inner mongolia technology (uym-c)	Universidade	China	Depositada	CN117713032-A
Univ zhejiang technology	Universidade	China	Depositada	CN113463113-A
Univ htbit rektoerluegue	Universidade	Turquia	Depositada	TR2022000772-U5
Univ rutgers state new jersey	Universidade	Estados Unidos	Concedida	US10358727-B2

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

As empresas presentes na amostra demonstram um foco predominante em soluções aplicadas e escaláveis para a cadeia de valor do hidrogênio, notavelmente o verde. Companhias como *Hualu Eng & Technology Co Ltd* e *Jiangsu Jinweixing Energy Technology Co* da China, e *Biox Co Ltd*, *Kolon Global Corp.* e *Korea Hydro & Nuclear Power Co Lte* da Coreia do Sul, detêm patentes concedidas. Essa consolidação de direitos de propriedade intelectual em áreas como a produção eficiente de hidrogênio (incluindo eletrólise fotovoltaica e otimização de eletrolisadores), o aproveitamento de biomassa e a integração com fontes de energia nuclear, sinaliza um forte posicionamento em mercados maduros ou em rápido desenvolvimento.

A inclusão da *Korea Hydro & Nuclear Power* destaca, por exemplo, a estratégica diversificação das fontes de energia para a produção de hidrogênio, explorando sinergias com a infraestrutura nuclear existente. Paralelamente, empresas como *Sinopec*, *Haidriver*, *Shaanxi Huaqin* e *Wison Eng* da China, bem como *Siemens Gamesa Renewable Energy* da Alemanha e *Natural Ocean Well Co* da Austrália, possuem patentes solicitadas. Essas solicitações abrangem inovações que vão desde o aproveitamento de resíduos para o HV, sistemas avançados de gerenciamento de energia de carbono quase zero, dispositivos de eletrólise de água pressurizada, até métodos de controle para usinas de hidrogênio integradas à rede elétrica. Essa expressiva atividade nas solicitações reflete um investimento massivo em PDEI e a ambição de diversos *players* em moldar as futuras gerações de tecnologias de hidrogênio, sublinhando o interesse global na integração do HV com infraestruturas de energias renováveis e gestão de rede.

Em contraste, as universidades, com seu portfólio de patentes majoritariamente solicitadas, representam a fronteira da pesquisa fundamental e da inovação em estágio inicial, com potencial para gerar tecnologias disruptivas. Instituições como *Univ Beijing Jiaotong*, *Univ Michigan*, *Univ Xiamen*, *Univ Yeungnam Res Coop Found*, *Univ Inner Mongolia Technology*, *Univ Zhejiang Technology E Univ Httit Rektoerluegue* estão explorando métodos biológicos e fotocatalíticos de baixo custo, otimização de sistemas e eletrólise avançada em grande escala, que formam a base para futuras aplicações industriais. No entanto, a presença de patentes concedidas de universidades como *Indian Inst Technology Bombay* e *Univ Rutgers State New Jersey* é notável. Suas contribuições em eletrocatalisadores bifuncionais e materiais de

cátodo avançados para eletrólise da água demonstram que a pesquisa acadêmica nessas instituições atingiu um nível de desenvolvimento que justifica a proteção patentária, indicando tecnologias com potencial iminente para licenciamento ou desenvolvimento comercial, catalisando a transferência de tecnologia para o mercado.

A análise revela uma estratégia complementar entre empresas e universidades no ecossistema de inovação do hidrogênio. Enquanto as empresas, com suas patentes concedidas e um robusto pipeline de solicitações, se concentram na escalabilidade, eficiência e integração de sistemas para aplicações comerciais imediatas e futuras, as universidades impulsionam a inovação desde suas bases, desenvolvendo materiais, processos e conceitos que formam o alicerce para as próximas gerações de tecnologias de HV. A forte presença de instituições chinesas, aliada à significativa participação de *players* da Coreia do Sul, Estados Unidos, Índia, Alemanha, Reino Unido, Austrália e Turquia, solidifica o cenário de competição e colaboração global intensa na busca por soluções sustentáveis para a produção e aplicação do hidrogênio.

4.3.2. Análise do resultado dos artigos

A análise dos 14 artigos selecionados oferece uma base sólida para compreender o panorama de pesquisa que sustenta o *roadmap* sobre os temas de HV e SI. Essa amostra permite identificar as contribuições acadêmicas mais relevantes, suas origens geográficas e os principais veículos de publicação, revelando tendências de investigação científica e apontando focos de colaboração em escala global. A Figura 14 apresenta a distribuição geográfica dos artigos analisados, destacando os países com maior produção científica entre os 14 estudos considerados.

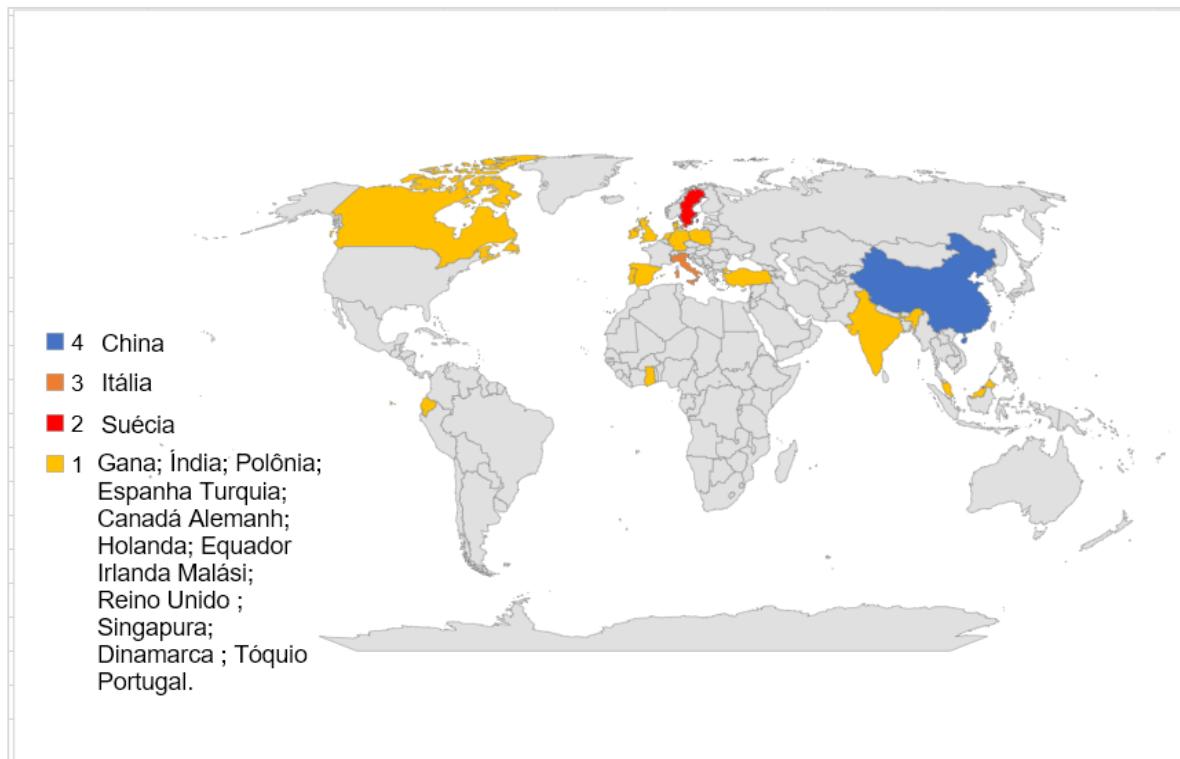


Figura 14. Distribuição dos artigos relacionados a construção do *roadmap* por país. Fonte: Elaborado pelo Autor (2025).

A China se sobressai com quatro artigos, consolidando sua posição como centro estratégico de pesquisa e inovação em HV e SI. Esse protagonismo já havia sido evidenciado na análise de patentes, demonstrando uma atuação consistente e integrada entre produção teórica e aplicação prática.

Em seguida, aparecem Itália e Suécia, com três e dois artigos, respectivamente. A Itália chama atenção por seu desempenho acadêmico expressivo, ainda que não tenha se destacado da mesma forma na análise de patentes. Isso sugere que sua contribuição está fortemente ligada ao avanço conceitual e teórico no campo de HV e SI. A Suécia, por sua vez, mesmo com um número menor de publicações, reforça sua presença no cenário científico com uma participação significativa.

Além desses países, a pesquisa aponta uma diversidade geográfica considerável entre os demais colaboradores, cada um com um artigo publicado. São eles: Gana, Índia, Polônia, Espanha, Turquia, Canadá, Alemanha, Holanda, Equador, Irlanda, Malásia, Reino Unido, Singapura, Dinamarca, Japão e Portugal. Essa

distribuição indica um envolvimento acadêmico global, refletindo o interesse crescente por HV e SI em diferentes contextos econômicos e ambientais.

Ao comparar a distribuição geográfica dos 14 artigos analisados (Figura 14) com os dados gerais de produção científica apresentados na Tabela 5, observa-se uma interseção significativa entre os países que aparecem em ambas as fontes, como China, Itália, Índia, Alemanha, Espanha, Reino Unido e EUA. Essa sobreposição sugere que embora a Figura 14 represente uma amostra mais restrita, ela reflete tendências consistentes com o panorama mais amplo da pesquisa sobre HV e SI. A presença recorrente desses países indica que eles não apenas têm uma produção científica volumosa, mas também aparecem com frequência mesmo em recortes menores, o que aponta para sua atuação consolidada e estratégica nesses temas.

Essa convergência pode ser explicada por alguns fatores. Primeiramente, países como China, Itália e Alemanha possuem políticas nacionais robustas de transição energética e desenvolvimento sustentável, o que impulsiona investimentos em pesquisa sobre HV e SI. Além disso, esses países frequentemente contam com estruturas consolidadas de colaboração entre universidades, centros de pesquisa e indústria, favorecendo tanto a produção científica quanto sua aplicação prática. A recorrência dessas nações em diferentes recortes analíticos revela que o interesse por HV e SI não está apenas na esfera acadêmica, mas alinhado a estratégias de desenvolvimento tecnológico e inovação industrial. Isso reforça a ideia de que o avanço desses temas está fortemente associado à capacidade dos países de articular ciência, tecnologia e política pública em torno da sustentabilidade e da economia circular.

Para complementar análise da configuração de artigos obtida, além da verificação dos países destaque a identificação dos periódicos mais relevantes para a publicação dos artigos selecionados é crucial para mapear o cenário da pesquisa e compreender os principais canais de disseminação do conhecimento em HV e SI.

Essa análise permite não apenas reconhecer as plataformas de maior impacto no campo, mas também direcionar futuras investigações para fontes de informação estratégicas e de alta qualidade. Nesse sentido, a Figura 15 apresenta os principais veículos de difusão científica onde os artigos examinados foram publicados, oferecendo uma visão consolidada sobre os fóruns de discussão predominantes na área.

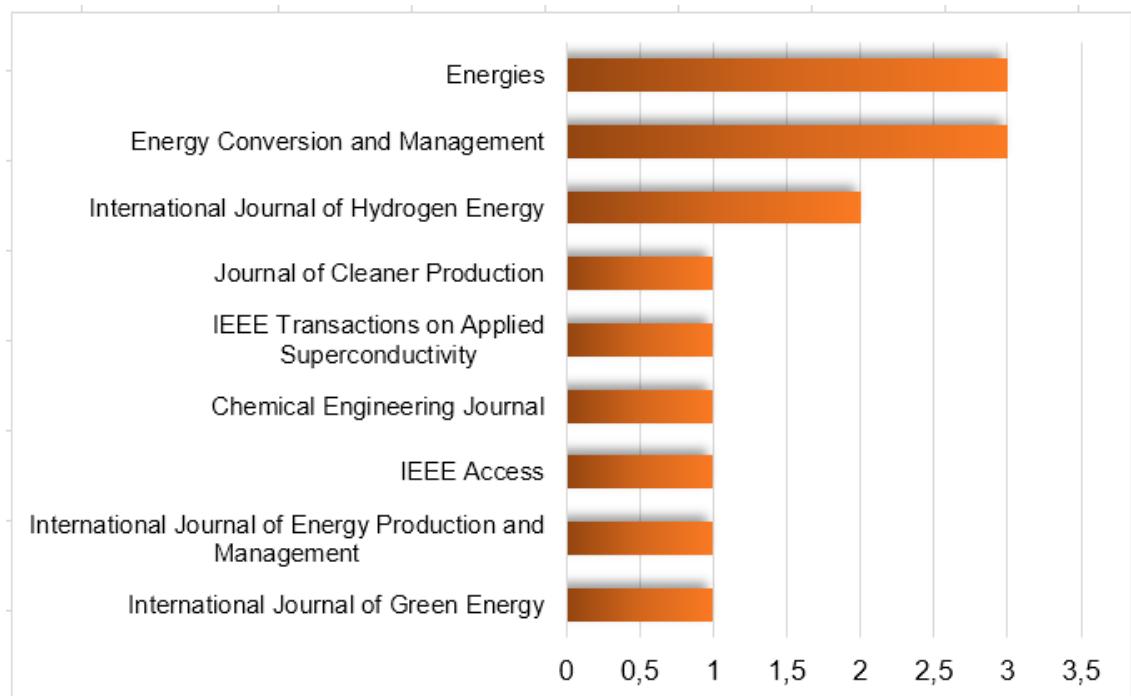


Figura 15. Periódicos com maior número de artigos relacionados a construção do *roadmap* tecnológico.
Fonte: Elaborado pelo Autor (2025).

Os periódicos *Energies* e *Energy Conversion and Management* destacam-se como os principais veículos de publicação relacionados ao tema do HV e SI, cada um com cerca de três artigos publicados. Em seguida, o *International Journal of Hydrogen Energy* apresenta aproximadamente dois artigos, consolidando-se como um periódico especializado de relevância na área. Outros periódicos, como *Journal of Cleaner Production*, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, *Chemical Engineering Journal*, *IEEE Access*, *International Journal of Energy Production and Management* e *International Journal of Green Energy*, contribuíram com cerca de um artigo cada.

A predominância de periódicos com escopo amplo em energia, como *Energies* e *Energy Conversion and Management*, demonstra a relevância crescente da temática

do HV dentro de debates energéticos mais amplos e interdisciplinares. Por outro lado, a presença de periódicos especializados, como o *International Journal of Hydrogen Energy* e o *International Journal of Green Energy*, evidencia que há um espaço consolidado para a publicação de estudos voltados especificamente ao desenvolvimento, aplicação e gestão de tecnologias associadas ao hidrogênio.

A inserção de títulos como *Journal of Cleaner Production* e *Chemical Engineering Journal* ressalta a importância dos aspectos de sustentabilidade e dos processos de engenharia nas discussões acadêmicas. Isso reforça a interligação entre os temas de HV e SI, uma vez que a SI se fundamenta em práticas que visam a eficiência de recursos, o reaproveitamento de resíduos e a integração entre processos produtivos pontos que são frequentemente abordados nesses periódicos.

Além disso, observa-se que parte significativa dos artigos foi publicada em periódicos ligados à engenharia, energia limpa e tecnologias emergentes. Essa diversidade indica que a produção científica relacionada ao HV e à SI está se expandindo para além de nichos altamente especializados, alcançando espaços com maior visibilidade interdisciplinar e potencial de impacto tanto acadêmico quanto tecnológico. Portanto, a análise do perfil das publicações revela não apenas a pluralidade temática, mas também o caráter estratégico da pesquisa em HV e SI no cenário atual da transição energética.

4.3.3. Desenvolvimento do eixo vertical (Análise Meso e Micro)

A taxonomia do eixo vertical do *roadmap* tecnológico, que reflete os resultados das análises meso e micro, conforme delineado na metodologia apresentada. Essa definição da taxonomia é um produto direto da análise macro realizada previamente, que se baseou na prospecção de patentes e artigos, fornecendo os subsídios para categorizar e aprofundar os temas-chave do estudo. A Tabela 9 a seguir apresenta as taxonomias definidas para a construção do *roadmap*.

Tabela 9 - Taxonomias definidas com base nas análises meso e análise micro

Categoria Meso (Eixo Vertical)	Itens Micro (Eixo Vertical)
Foco no documento	Matéria-Prima, processos de produção, aplicação.
Matéria-prima	Água, água residual, biomassa, gás natural renovável.
Tecnologia e recursos	Energia solar, energia eólica, hidrelétrica, Reforma a vapor, biorrefinaria, eletrolisador, simbiose industrial.
Aplicação	Geração de energia, transporte, refinarias, armazenamento de energia, indústria química, Indústria do aço, células de combustível.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

Cada categoria principal (análise meso) é desdobrada em seus componentes específicos (análise micro), permitindo uma visão detalhada dos elementos que compõem o campo de estudo da SI e do HV. A seguir, a análise técnica de cada um desses itens:

Foco no documento:

- Matéria-Prima: refere-se à categoria de documentos ou seções de documentos que abordam a origem e a natureza dos insumos necessários para a produção de HV, bem como a gestão de recursos dentro do contexto da SI. Esta categoria é fundamental para entender a base de recursos renováveis ou subprodutos que podem ser utilizados.
- Processos de produção: abrange os documentos ou discussões que detalham as rotas tecnológicas e os métodos empregados para a conversão da matéria-prima em HV. Inclui tecnologias de eletrólise, reforma, e outros processos envolvidos, bem como a otimização desses processos pela integração via SI.
- Aplicação: engloba as seções ou documentos que tratam dos usos finais do HV e dos produtos/serviços resultantes da SI. Isso pode incluir o uso em diferentes setores industriais, transporte, ou para armazenamento de energia, demonstrando o valor agregado e o impacto da tecnologia.

Matéria-prima:

- Água: destaca a água como um insumo primário para a eletrólise do hidrogênio. A análise foca na qualidade da água, disponibilidade e na otimização de seu consumo.
- Água residual: aborda o potencial da água proveniente de efluentes industriais ou municipais como matéria-prima para a produção de HV.
- Biomassa: refere-se ao uso de material orgânico (resíduos agrícolas, florestais, industriais, etc.) como fonte para a produção de HV através de processos como gaseificação ou reforma de biomassa.
- Gás natural renovável: Considera o biometano ou gás natural sintético (produzido a partir de fontes renováveis) como matéria-prima para a produção de hidrogênio, geralmente via reforma a vapor ou pirólise, com a captura de carbono.

Tecnologia e recursos:

- Energia solar: foca na utilização da energia solar fotovoltaica ou termodinâmica como fonte de eletricidade para a eletrólise da água, sendo um pilar fundamental para a produção de HV.
- Energia eólica: similar à solar, destaca a energia gerada por turbinas eólicas como fonte de eletricidade para a produção de hidrogênio, contribuindo para a redução da pegada de carbono do processo.
- Hidrelétrica: aborda o uso da energia gerada por usinas hidrelétricas para a produção de hidrogênio, reconhecendo seu papel como fonte renovável e de base para a eletrólise.
- Reforma a vapor: descreve a tecnologia de produção de hidrogênio a partir de combustíveis como gás natural ou biometano, através de uma reação com vapor d'água em altas temperaturas. Embora possa ser associada a fontes fósseis, seu uso com gás natural renovável ou acoplada a captura de carbono a insere no contexto de transição energética.
- Biorrefinaria: refere-se à integração de processos que convertem biomassa em uma gama de produtos de base biológica (biocombustíveis, bioquímicos, bioproductos) e energia, incluindo o hidrogênio.

- Eletrolisador: Tecnologia central para a produção de hidrogênio verde, onde a água é dividida em hidrogênio e oxigênio pela passagem de corrente elétrica. A análise incluiria os diferentes tipos de eletrolisadores (PEM, alcalinos, SOEC) e seus avanços.
- Simbiose Industrial: A própria categoria de análise meso, que se refere à prática de colaboração entre indústrias, onde resíduos ou subprodutos de uma empresa se tornam insumos para outra, otimizando o uso de recursos e reduzindo o impacto ambiental. No contexto do HV, isso pode incluir o aproveitamento de calor residual, CO₂, ou água.

Aplicação:

- Geração de energia: aborda o uso do hidrogênio verde para gerar eletricidade, seja em células a combustível, turbinas a gás adaptadas ou cogeração, contribuindo para a estabilidade e descarbonização da matriz energética.
- Transporte: refere-se à aplicação do hidrogênio verde como combustível para veículos (carros, ônibus, trens, navios, aeronaves) equipados com motores a hidrogênio ou células a combustível, visando a descarbonização do setor.
- Refinarias: explora o papel do hidrogênio verde nas refinarias de petróleo, substituindo o hidrogênio cinza (produzido a partir de combustíveis fósseis) em processos como hidrotratamento e hidrocraqueamento, reduzindo as emissões do setor.
- Armazenamento de energia: discute as tecnologias e métodos para armazenar hidrogênio (comprimido, liquefeito, em carreadores como amônia) para uso posterior, essencial para balancear a intermitência das fontes renováveis e para a logística de distribuição.
- Indústria química: abrange o uso do HV como matéria-prima ou agente redutor na produção de diversos produtos químicos, como amônia (fertilizantes), metanol, e outros produtos petroquímicos, descarbonizando esses processos.
- Industrial do aço: foca na aplicação do HV como redutor direto do minério de ferro em fornos de arco elétrico ou em processos de redução direta, substituindo o carvão e o gás natural, para produzir aço com baixas emissões de carbono.

- Células de combustível: Descreve a tecnologia que converte a energia química do hidrogênio diretamente em eletricidade e calor através de uma reação eletroquímica, sem combustão, com alta eficiência e zero emissões no ponto de uso, sendo uma aplicação chave do HV.

4.3.4. Construção do *roadmap* tecnológico

Após a conclusão das fases de análise, que envolveram as perspectivas macro, meso e micro, o estudo alcança agora a etapa de construção do *roadmap*. Com o conhecimento consolidado a partir dessas análises, torna-se possível materializar visualmente as direções e etapas futuras do campo investigado. Para essa construção e a representação gráfica detalhada do *roadmap*, foi utilizado o software Microsoft Visio, ferramenta que auxilia na organização e na clareza da projeção estratégica. A discussão subsequente será fundamentada no fluxo temporal delineado no *roadmap*, abordando o estágio atual, o curto prazo, o médio prazo e o longo prazo, conforme visualizado nas imagens do *roadmap* construídas.

4.3.4.1. Estágio Atual

A Figura 16 destaca o *roadmap* tecnológico no estágio atual, em que as principais empresas e parcerias já estão ativamente explorando tecnologias para a produção de HV a partir de fontes renováveis. Ao analisar as setas que conectam essas empresas aos diferentes níveis da cadeia de valor (Matéria-Prima, Tecnologia/Recursos e Aplicação), é possível identificar algumas tendências claras.

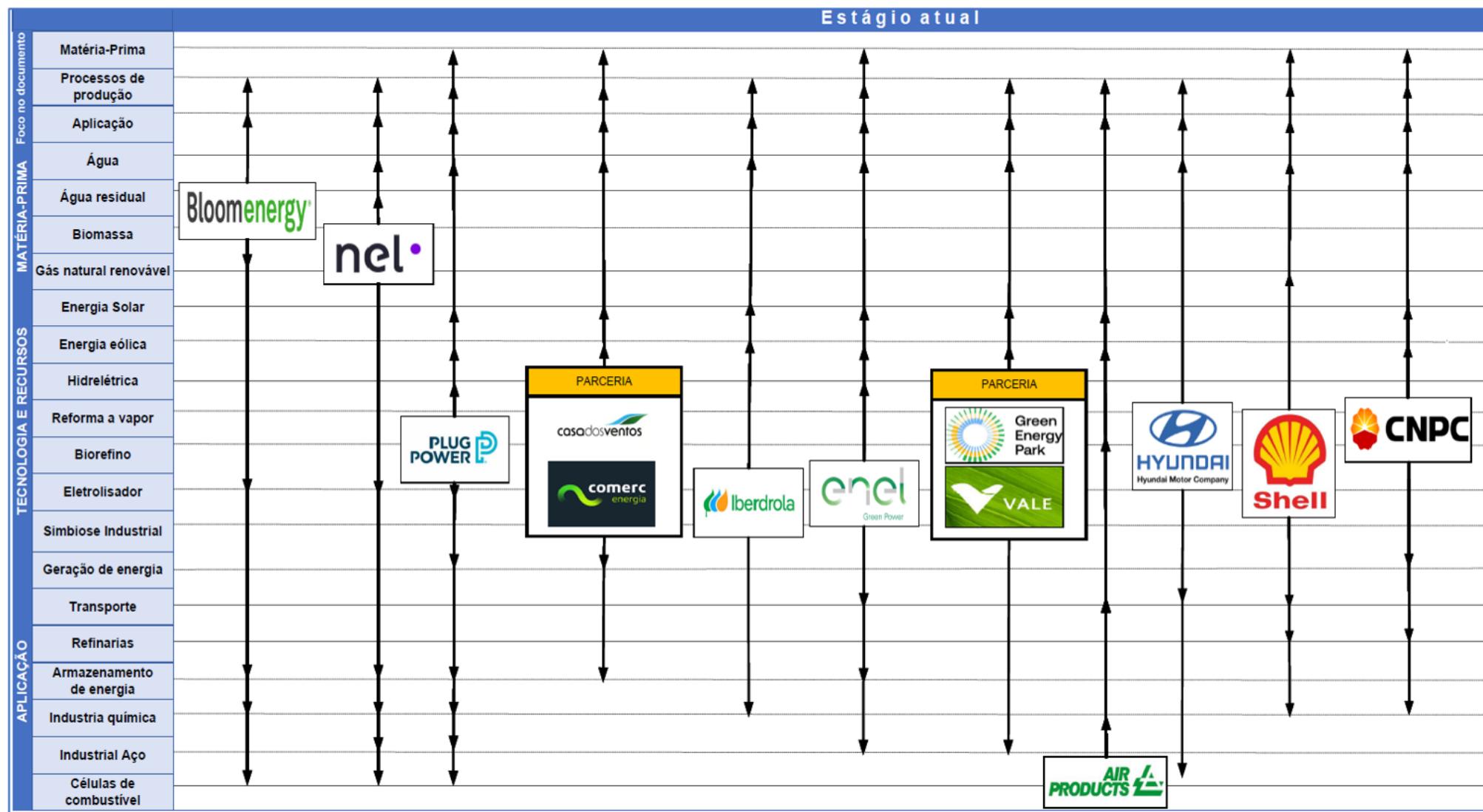


Figura 16. Roadmap tecnológico para o estágio atual. Fonte: Elaborado pelo Autor (2025).

Analisando a Figura 16, em termos de matéria-prima, observa-se que a água aparece como a principal matéria-prima para a produção de hidrogênio no estágio atual. Esse protagonismo é evidenciado pelas longas setas associadas a empresas como Bloom Energy, Plug Power, Nel, Iberdrola e Enel, que concentram esforços na utilização de eletricidade para o processo de eletrólise da água, consolidando essa rota como a mais madura e dominante no momento. O gás natural renovável, embora presente, mostra setas menos representativas, indicando que seu papel ainda é complementar e não central na configuração atual da cadeia produtiva. Já a biomassa surge de forma pontual, sugerindo que, até o momento, seu uso permanece limitado e secundário.

No nível de Tecnologia/Recursos, a eletrólise se consolida como a tecnologia mais recorrente, refletindo sua relevância para o avanço inicial da indústria de HV. Empresas líderes em eletrolisadores, como Nel, Plug Power e Bloom Energy, dominam essa rota, enquanto grandes grupos energéticos como Iberdrola e Enel Green Power fortalecem a aplicação de eletricidade renovável nesse processo. As parcerias estratégicas, como Comerc Energia + Casa dos Ventos e Vale + Green Energy Park, reforçam o movimento de integração entre setores elétrico e industrial para viabilizar o HV em escala. Em contraste, a reforma a vapor aparece de maneira marginal, com baixa representatividade, o que reflete sua limitação frente às exigências de sustentabilidade e neutralidade de carbono.

No eixo de Aplicação, verifica-se maior concentração de setas direcionadas a transporte, armazenamento de energia, indústria química e siderurgia, destacando esses setores como prioritários na implementação do HV em escala industrial. Hyundai, Shell e CNPC aparecem com conexões diretas para essas áreas, sinalizando que as grandes corporações globais já estruturaram estratégias de descarbonização em setores de alta intensidade energética e na mobilidade sustentável.

De forma geral, os dados do roadmap para o estágio atual confirmam que a eletrólise associada à energia elétrica renovável ocupa posição central nas estratégias tecnológicas. O gás natural renovável, embora apareça, não desempenha papel dominante nesta fase, sendo a eletricidade a principal base para a produção de HV. Esse arranjo demonstra um avanço real de projetos que ultrapassam a fase

experimental, apoiados por grandes empresas e parcerias estratégicas, consolidando o HV como alternativa concreta para a transição energética já no presente.

4.3.4.2. Curto Prazo

Avançando no horizonte temporal do *roadmap*, a seção de Curto Prazo concentra-se nas projeções e diretrizes estratégicas para o período imediato, compreendendo um horizonte de 0 a 5 anos. Conforme já mencionado, a análise para esta fase foi fundamentalmente embasada em documentos patentários já concedidos, que representam tecnologias com potencial de inserção no mercado nesse intervalo. A Figura 17 apresenta os resultados da elaboração do horizonte de médio prazo.

Este segmento, visualmente representado na estrutura do *roadmap*, aborda as iniciativas e os marcos esperados, detalhando os avanços tecnológicos, as colaborações e os objetivos táticos considerados prioritários para impulsionar o desenvolvimento inicial da área.

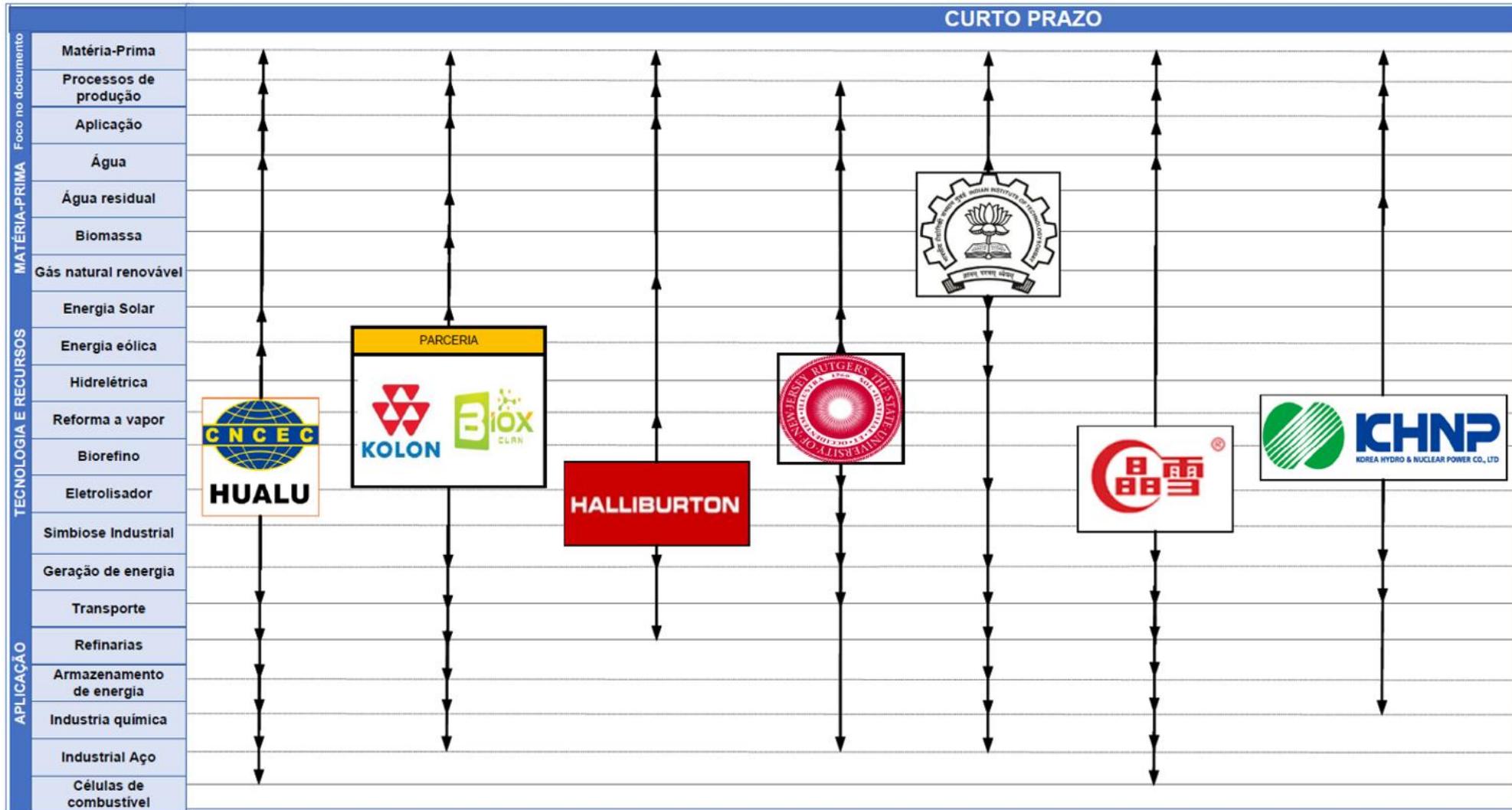


Figura 17. Roadmap tecnológico para o horizonte de curto prazo. Fonte: Elaborado pelo Autor (2025).

Na Figura 17, o *roadmap* tecnológico apresentado para o curto prazo evidencia uma maior diversificação de atores e rotas de produção de HV, refletindo as tendências emergentes identificadas tanto por publicações científicas quanto por registros de patentes.

Na categoria de Matéria-Prima, observa-se que a água continua exercendo papel central, sustentando a rota da eletrólise como caminho consolidado para o HV. Contudo, nota-se também a entrada em biomassa, representada pela parceria Kolon + Biox Clean, sinalizando esforços no desenvolvimento de processos de biorefinaria capazes de converter resíduos orgânicos em hidrogênio. Além disso, o gás natural renovável ganha destaque pela empresa Halliburton, que desenvolve tecnologias que podem ser aplicadas em projetos de produção de hidrogênio, incluindo tecnologias para a captura de carbono. Essa configuração mostra que o curto prazo será caracterizado por uma diversificação de insumos energéticos, sem, contudo, deslocar a centralidade da eletricidade renovável.

No nível de Tecnologia/Recursos, observa-se um cenário marcado pela pluralidade de abordagens tecnológicas. A energia solar destaca-se como recurso chave em relação as demais fontes de energias renováveis, mas há menção pontual para o uso de hidrelétricas pela *Indian Institute of Technology* (IIT). Neste bloco já se observa menção a SI pelas universidades de Rutgers University e *Indian Institute of Technology* o que já caracteriza a presença de uma rede de colaboração, o uso de mais de uma fonte de energia renovável é apontado pelas setas em que pode configurar uma simbiose de processos. Além disso, a presença de parcerias entre empresas de diferentes setores indica uma movimentação em direção a modelos híbridos de produção.

No eixo de Aplicação, há um cenário mais genérico em que a utilização do hidrogênio obtido é bastante diversificada, se destacando em várias áreas como armazenamento de energia, transporte e aplicações industriais com destaque para a indústria do aço, industrial química e refinarias. Este panorama pode representar um investimento a curto prazo em áreas já consolidadas dentro da produção e utilização de HV, ainda com poucas possibilidades de inovações, mas com indícios de novas ideias como por exemplo o envolvimento da KHN (Korea Hydro & Nuclear Power), que busca integrar o hidrogênio à sua matriz energética e explorar sinergias com sua infraestrutura nuclear.

De forma geral, os dados do *roadmap* para o curto prazo sugerem um cenário de transição tecnológica, no qual a água permanece como principal matéria-prima, mas dividindo espaço com rotas complementares como água residual, biomassa e gás natural renovável. A participação de empresas tradicionais, startups e universidades indica que a evolução do HV no curto prazo dependerá fortemente de colaborações estratégicas e do desenvolvimento de soluções híbridas.

4.3.4.3. Médio Prazo

Prosseguindo na progressão temporal do *roadmap*, a seção de médio prazo delineia as tendências e projeções estratégicas para um horizonte de 5 a 10 anos. Conforme já mencionado, a fundamentação para esta fase provém de pedidos de patentes (ainda não concedidos), indicando tecnologias que se encontram em desenvolvimento e que se espera que alcancem o mercado nesse período. A Figura 18 apresenta os resultados da elaboração do horizonte de médio prazo.

Este segmento, igualmente representado visualmente na estrutura do *roadmap*, detalha os avanços tecnológicos, as colaborações e os objetivos intermediários que são cruciais para a consolidação e expansão da área em questão.

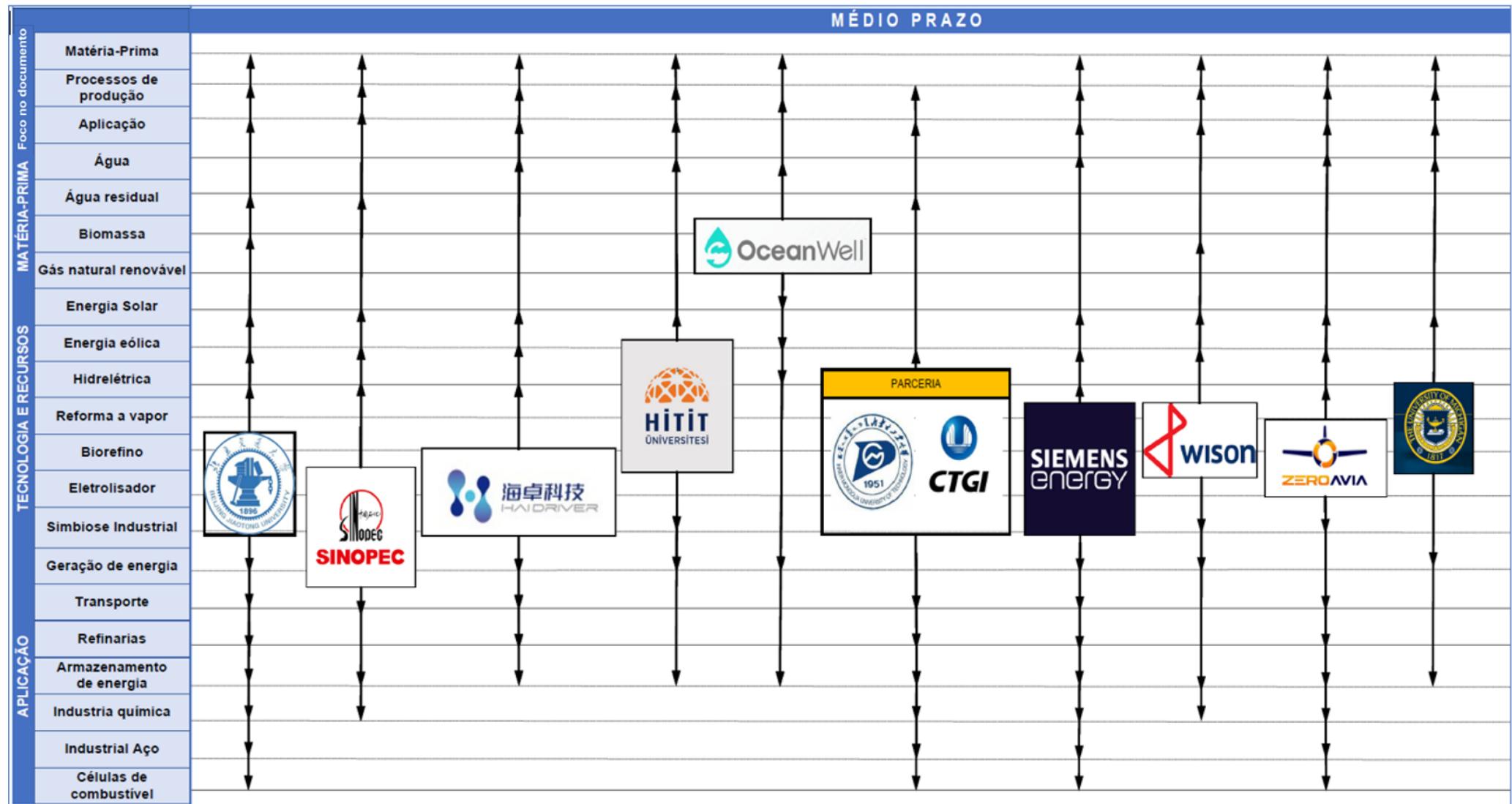


Figura 18. Roadmap tecnológico para o horizonte de médio prazo. Fonte: Elaborado pelo Autor (2025).

Na análise da Figura 18 do *roadmap* tecnológico referente ao médio prazo, que representa um horizonte temporal de aproximadamente 5 a 10 anos, observa-se uma evolução significativa nas tecnologias voltadas à produção de HV, com destaque para processos mais eficientes e o uso de matérias-primas diversificadas. Esse período é caracterizado pela consolidação de novas parcerias, avanço em processos eletrolíticos e integração de diferentes fontes de energia para a geração sustentável de hidrogênio.

No campo de Matérias-Primas e recursos tecnológicos no eixo vertical do *roadmap*, percebe-se uma forte presença de tecnologias que exploram água residual, apesar de não se destacar completamente neste período já se observa maior presença de uma segunda matéria-prima em contraste com a água. A energia solar, eólica e hidrelétricas tiveram pontuações similares pelas setas como principais insumos para a produção de hidrogênio, demonstrando que a partir deste período o estudo para utilização de outras energias renováveis tem aumentando. Instituições como SINOPEC, *Hynover*, *Natural Ocean Well* e *HITIT University* concentram seus esforços em tecnologias que aproveitam fontes hídricas para processos de eletrólise e recuperação de resíduos industriais. Esse enfoque reflete uma tendência crescente de explorar insumos abundantes e de baixo custo para viabilizar economicamente o HV.

No campo de Tecnologias, destacam-se os processos de eletrólise avançada e sistemas híbridos que combinam geração de energia renovável e tratamento de resíduos. Por exemplo, a tecnologia patenteada pela *Hynover* foca em processos de gestão de energia quase zero carbono, integrando sistemas de armazenamento de hidrogênio, enquanto a patente da *HITIT University* aborda sistemas para produção sustentável que controlam fluxos de hidrogênio e oxigênio de maneira otimizada. Essa integração é fundamental para melhorar a eficiência dos processos e reduzir custos operacionais.

Além disso, empresas como *Siemens*, *Gamesa*, *Renewable Energy* e *Wison Co Ltd* destacam-se pelo desenvolvimento de tecnologias que combinam geração elétrica com processos de eletrólise, reforçando a importância da integração de diferentes fontes energéticas para alcançar maior sustentabilidade. As suas patentes exemplificam essa tendência ao propor soluções que combinam armazenamento de

energia com eletrólise, permitindo flexibilidade operacional e melhor aproveitamento energético.

Nota-se uma diversificação nas frentes industriais que se beneficiam do HV. Desde a produção de aço e armazenamento de energia até a mobilidade aérea, os atores estão explorando uma ampla gama de possibilidades. A ZeroAvia trabalha na integração de sistemas para a produção de hidrogênio aplicados à aviação, um setor que demanda soluções com alta densidade energética e baixos impactos ambientais.

Tendências e perspectivas futuras o movimento geral observado nesse *roadmap* sugere que as tecnologias de médio prazo estão focadas em aumentar a eficiência dos processos de eletrólise, reduzir a dependência de matérias-primas convencionais e promover a integração setorial do HV. A parceria entre universidades e grandes corporações, como a colaboração entre a Universidade de Michigan e CTGC-C reflete a importância da inovação colaborativa para superar os desafios técnicos e econômicos que ainda limitam a adoção em larga escala do HV. Essas estratégias, se bem-sucedidas, têm o potencial de consolidar o hidrogênio como uma alternativa viável aos combustíveis fósseis, promovendo uma transição energética mais rápida e sustentável.

4.3.4.4. Longo Prazo

Finalizando a projeção temporal do *roadmap*, a seção de longo prazo foca nas inovações e tendências disruptivas para um horizonte de 10 a 15 anos. Conforme amplamente discutido nas análises anteriores, a base para esta perspectiva é derivada de artigos científicos, cujos produtos e tecnologias descritos representam o que provavelmente será inserido no mercado nesse período estendido. A Figura 19 apresenta os resultados da elaboração do horizonte de médio prazo.

Este segmento do *roadmap*, representado visualmente, apresenta as visões futuras, os desafios de pesquisa fundamental e as oportunidades estratégicas que moldarão o campo em longo termo guiando esforços de PDel.

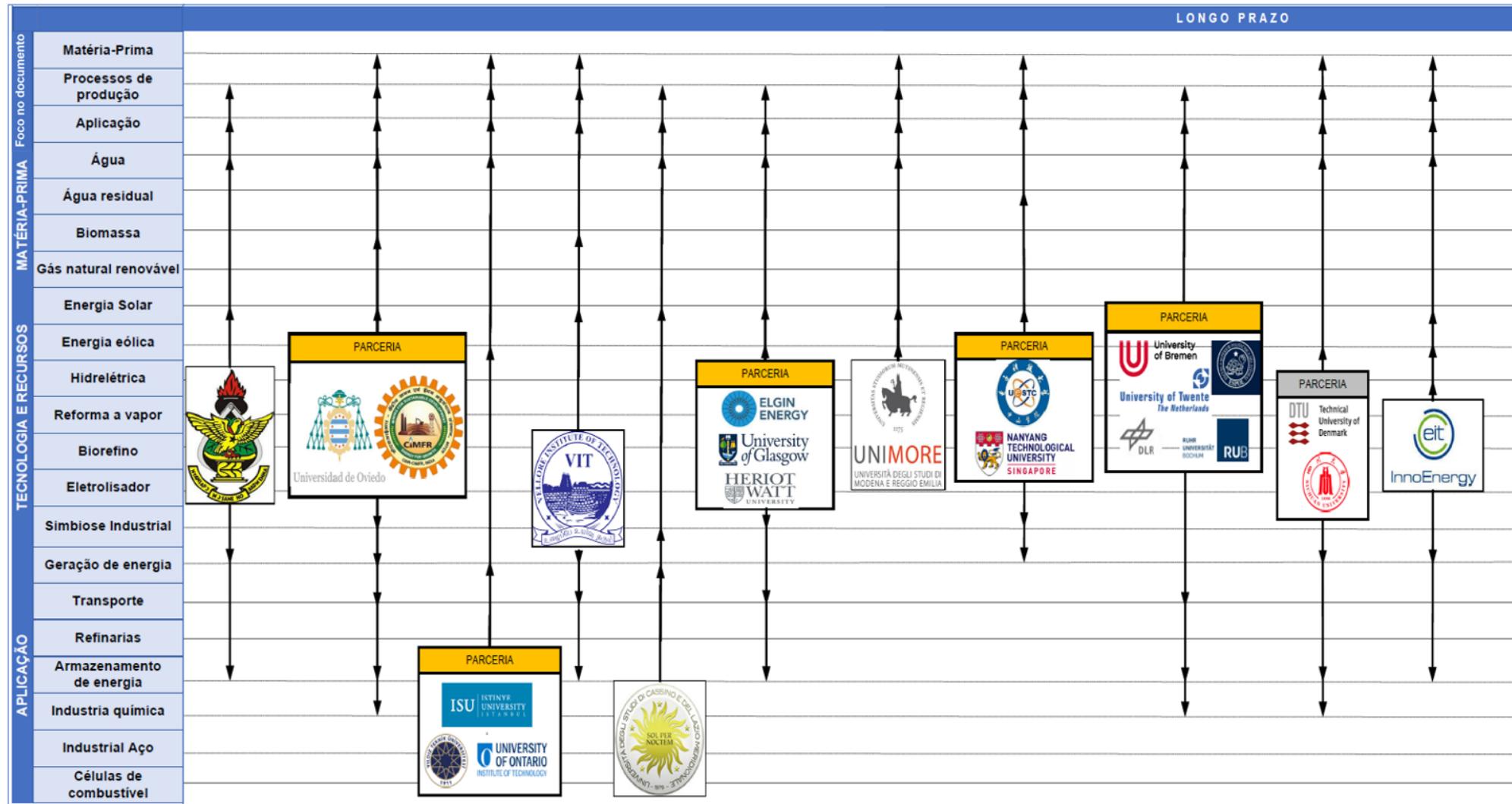


Figura 19. Roadmap tecnológico para o horizonte de longo prazo. Fonte: Elaborado pelo Autor (2025).

Na análise da Figura 19 do *roadmap* tecnológico referente ao longo prazo, que representa um horizonte temporal de aproximadamente 10 a 15 anos, observa-se um avanço na pesquisa e desenvolvimento de tecnologias voltadas ao HV, com foco na consolidação de rotas tecnológicas maduras e na ampliação das aplicações industriais. Essa fase é marcada por parcerias estratégicas entre universidades, centros de pesquisa e instituições internacionais, refletindo um esforço global para viabilizar o hidrogênio como vetor energético essencial para a transição energética sustentável.

No eixo de matérias-primas, percebe-se a diversificação no uso de insumos, com destaque para o aproveitamento de água residual e biomassa, além do fortalecimento do uso de fontes renováveis como energia solar e energia eólica. A Universidade de Oviedo, em parceria com universidades latino-americanas e africanas, investe em soluções baseadas na recuperação de água residual como insumo para processos de eletrólise. Já o *Vellore Institute of Technology* (VIT) e o *Indian Institute of Technology* concentram esforços na conversão de biomassa em hidrogênio, promovendo rotas de produção sustentáveis e integradas a resíduos orgânicos.

Além disso, instituições como a *University of Glasgow*, *Heriot-Watt University* e Elgin Energy desenvolvem soluções híbridas baseadas em energia solar e eólica para alimentar eletrolisadores avançados, sinalizando um movimento de maior integração entre fontes renováveis e tecnologias de produção de hidrogênio.

Entre as tecnologias mapeadas no longo prazo, destacam-se os processos de eletrólise de alta eficiência, reforma a vapor de baixo carbono, refino biológico e SI, com foco na otimização de processos e no aproveitamento de subprodutos. A parceria entre as universidades alemãs *University of Twente*, *University of Bremen*, DLR (Centro Aeroespacial Alemão) e a Universidade *Ruhr* de Bochum (RUB) exemplifica esse avanço, promovendo pesquisas em processos combinados de reforma e eletrólise, buscando maior eficiência energética e menor pegada de carbono.

A *Nanyang Technological University Singapore*, por sua vez, juntamente com universidades europeias, trabalha em sistemas de SI para a produção integrada de hidrogênio e produtos químicos, otimizando fluxos energéticos e materiais no ambiente fabril.

O desenvolvimento de biorrefino também é foco da Universidade de Modena (Itália) e Reggio Emilia (UNIMORE), que investiga o uso de resíduos agrícolas e urbanos para obtenção de hidrogênio e coprodutos de valor agregado.

No eixo de aplicação, o HV assume um papel central em setores de difícil descarbonização, como a indústria do aço, refinarias, armazenamento de energia e células de combustível. A UNIMORE, por exemplo, explora a aplicação de HV na produção de aço com baixa emissão, enquanto a *Iowa State University* e a *University of Ontario Institute of Technology* trabalham em soluções para o armazenamento de energia com base em hidrogênio, promovendo a flexibilidade e estabilidade de redes elétricas renováveis.

A DTU (*Technical University of Denmark*), em parceria com a Universidade de Bolonha (Itália), investe em tecnologias voltadas à indústria química, buscando substituir insumos fósseis por rotas baseadas em hidrogênio. Já a *EIT InnoEnergy*, instituição europeia de inovação, atua em diversas frentes relacionadas a células de combustível e desenvolvimento de sistemas completos de economia do hidrogênio, promovendo a integração tecnológica em escala continental.

O panorama delineado neste *roadmap* de longo prazo aponta para uma consolidação do hidrogênio como pilar estratégico da transição energética global. As tecnologias tendem a convergir para processos mais eficientes, sustentáveis e integrados, com foco na redução do custo de produção por meio do uso de resíduos e biomassa, na integração entre setores industriais através de simbiose energéticas, no fortalecimento de parcerias internacionais entre universidades e centros tecnológicos, e na ampliação das aplicações industriais críticas, especialmente na substituição de combustíveis fósseis. A maturidade tecnológica esperada para esse período sugere que o HV deixará de ser uma promessa para se tornar uma realidade operacional em larga escala, com impactos significativos na descarbonização global e na segurança energética.

Após a elaboração do *roadmap* tecnológico, realizou-se uma análise do nível de maturidade das tecnologias identificadas, com base na classificação TRL. Essa abordagem, originalmente desenvolvida pela NASA, permite avaliar o grau de desenvolvimento e prontidão de uma tecnologia, variando do TRL 1 (princípios básicos observados) ao TRL 9 (tecnologia comprovada em ambiente operacional real). A

utilização desse sistema facilita a compreensão do estágio de evolução das soluções tecnológicas mapeadas, além de fornecer subsídios para o planejamento estratégico e a priorização de investimentos PDel. A Tabela 10 mostra de forma resumida a classificação geral do nível de maturidade tecnológica com base nos estágios de tempo do *roadmap* (estágio atual, curto prazo, médio prazo e longo prazo).

Tabela 10 - Classificação do nível de maturidade tecnológica (TRL) das tecnologias apresentadas em cada período de tempo do *roadmap* tecnológico

Fluxo de tempo	Atividades Tecnológicas Previstas	Descrição do Estágio	TRL Estimado	Comentário Técnico
Estágio Atual	Produção comercial de HV com eletrólise renovável; pilotos industriais com SI	Tecnologias maduras e em operação comercial	TRL 8–9	Sistemas integrados operando em escala industrial, com padrões e rotas definidas.
Curto Prazo	Ampliação de rotas híbridas, escalonamento de plantas com SI e CCUS	Otimização e replicação de modelos existentes	TRL 6–7	Tecnologias com demonstração funcional em ambientes reais, ainda exigem ajustes.
Médio Prazo	Integração de novas fontes (resíduos, efluentes), digitalização e redes simbióticas	Demonstração de tecnologias em ambientes setoriais	TRL 5–6	Sistemas com integração parcial; foco em testes e interoperabilidade.
Longo Prazo	Redes simbióticas autônomas; IA, <i>blockchain</i> , comercialização global	Desenvolvimento experimental e testes sistêmicos	TRL 3–4	Tecnologias emergentes com aplicações futuras; alto potencial, baixa maturidade.

Fonte: elaborado pelo autor (2025).

A classificação das tecnologias segundo a escala TRL mostrou-se coerente com os estágios evolutivos mapeados no *roadmap* tecnológico construído nesta pesquisa. A análise permitiu compreender como a maturidade das soluções tecnológicas dialoga com os horizontes temporais projetados e reforça a lógica progressiva de desenvolvimento técnico e estratégico da integração entre SI e HV.

O estágio atual, classificado como TRL 8–9, reflete um cenário em que as principais rotas tecnológicas já estão em operação comercial, com aplicações consolidadas, especialmente no contexto da eletrólise renovável e uso industrial do HV. Essa classificação elevada indica que essas soluções não apenas foram validadas em ambiente real, mas já estão sendo replicadas em escala, o que corrobora a presença de empresas consolidadas no setor, como Plug Power e Nel Hydrogen. Esse nível de prontidão é compatível com o grau de implementação observado em algumas iniciativas globais de produção de HV como a Estratégia de Hidrogênio da União Europeia (Comissão europeia, 2020) e as diretrizes da IEA para o hidrogênio (*International Energy Agency*, 2019), associadas a *clusters* industriais.

Em contrapartida, as tecnologias alocadas nos estágios de médio e longo prazo receberam classificações progressivamente mais baixas de TRL (5–6 e 3–4, respectivamente), o que é tecnicamente justificável. No médio prazo, apesar de já existirem protótipos em demonstração e algum grau de integração industrial em ambientes reais, muitas das tecnologias como o uso de resíduos industriais como insumo energético e plataformas digitais de gestão de sinergias ainda carecem de padronização e robustez operacional. Isso evidencia uma transição em andamento, mas que ainda exige superação de barreiras tecnológicas, regulatórias e organizacionais.

Já no longo prazo, os TRLs mais baixos (3–4) indicam o caráter disruptivo das tecnologias previstas, como a integração de *blockchain* e SI totalmente automatizadas. Essas soluções, embora teoricamente promissoras, ainda se encontram nos estágios iniciais de desenvolvimento, sendo testadas apenas em ambiente laboratorial ou simulado. A expectativa de sua maturação está alinhada com projeções de longo ciclo tecnológico e dependência de avanços estruturais em infraestrutura, regulação e cultura organizacional.

A correspondência entre os horizontes temporais do *roadmap* e a escala TRL atribuída confirma que o modelo proposto nesta dissertação respeita uma lógica evolutiva plausível, tanto do ponto de vista técnico quanto estratégico. Essa coerência fortalece a utilidade do *roadmap* como instrumento de planejamento e priorização tecnológica, permitindo visualizar não apenas o que se desenvolverá, mas também

quando e com que nível de maturidade as tecnologias poderão ser adotadas em escala.

5. CONCLUSÕES

Esta dissertação teve êxito em investigar, por meio de uma abordagem metodológica integrada, o potencial de sinergia entre a SI e a produção de HV a partir de fontes renováveis. A análise bibliométrica ofereceu um diagnóstico preciso do estado da arte da produção científica sobre o tema, enquanto o *roadmap* tecnológico projetou caminhos estratégicos para essa integração, considerando suas múltiplas dimensões técnica, ambiental, econômica e institucional. Observou-se que, apesar do notável crescimento na produção científica e do interesse global na transição energética, a interseção direta entre SI e HV ainda se encontra em um estágio inicial, configurando tanto uma grande oportunidade de inovação quanto desafios complexos a serem superados.

A convergência entre SI e HV oferece uma série de vantagens cruciais para a sustentabilidade e economia. Ela promove a eficiência no uso de recursos, permitindo o reaproveitamento de subprodutos e resíduos, o que otimiza os fluxos de matéria e energia. Consequentemente, a redução de custos é alcançada pelo uso compartilhado de infraestrutura industrial e energética, diminuindo os investimentos em produção e distribuição do HV. A descarbonização é outro benefício direto, com a substituição de fontes fósseis por HV alinhado à EC, resultando na redução das emissões de GEE. Adicionalmente, a formação de redes simbióticas fortalece a resiliência industrial, aumentando a capacidade adaptativa dos sistemas produtivos frente a instabilidades externas, sejam elas climáticas, econômicas ou geopolíticas.

Contudo, apesar do seu potencial transformador, a integração entre SI e HV ainda enfrenta obstáculos estruturais e conjunturais significativos. Entre os principais desafios, destacam-se os altos custos tecnológicos iniciais especialmente para eletrolisadores e sistemas de armazenamento, a ausência de regulamentações específicas para a comercialização e uso do HV em contextos simbióticos, e o baixo nível de cooperação intersetorial e interdisciplinar, que dificulta a consolidação de redes de inovação eficazes. Soma-se a isso a resistência de setores industriais tradicionais em adotar práticas colaborativas e circulares. Embora a viabilidade

técnica da integração entre SI e HV seja crescente, há um descompasso notável entre esse avanço e a disponibilidade de políticas públicas e mecanismos de financiamento que sustentem sua implementação em escala. Nesse sentido, fóruns internacionais como a COP28, a Cúpula Global do Hidrogênio e o *Clean Energy Ministerial* (CEM) têm destacado repetidamente a necessidade de políticas coordenadas, incentivos fiscais, marcos regulatórios claros e instrumentos de cooperação multilateral para acelerar a transição energética e o desenvolvimento de cadeias globais do hidrogênio. Esses eventos reforçam que o avanço tecnológico, por si só, não é suficiente sem um ambiente institucional global que promova segurança jurídica, integração de esforços e visão estratégica de longo prazo. A ausência dessas condições pode restringir os avanços a iniciativas isoladas e de alcance limitado, mesmo em países com elevado potencial técnico ou natural.

A análise bibliométrica apontou a China como principal liderança global na produção científica relacionada à integração entre SI e HV, seguida por países europeus e pela Índia. O protagonismo chinês, entretanto, não se restringe ao campo acadêmico: ele se estende à prática industrial, com investimentos robustos, políticas públicas assertivas e a formação de ecossistemas produtivos interligados, impulsionados por uma estratégia nacional bem coordenada. Em contraste, o Brasil apresentou participação mínima nas publicações científicas analisadas nesta dissertação, evidenciando um distanciamento ainda significativo da fronteira do conhecimento nesse tema emergente.

Apesar disso, o país possui vantagens estruturais notáveis, como uma matriz elétrica predominantemente renovável, ampla disponibilidade de biomassa e resíduos agroindustriais, e potencial competitivo para se consolidar como exportador de HV e seus derivados. A recente criação do Programa Nacional do Hidrogênio (PNH2) pelo governo federal sinaliza um primeiro passo importante para articular políticas, investimentos e esforços interinstitucionais. Se estruturado com metas claras, incentivos estáveis e forte articulação entre Estado, setor produtivo e academia, o PNH2 poderá transformar o Brasil de um observador periférico em um agente estratégico da transição energética global, seguindo os exemplos de coordenação e escala observados em países como a China.

Aplicar esses princípios à produção de HV promete reduzir custos, aumentar a eficiência energética e minimizar a pegada de carbono, contribuindo para a transição energética global. O futuro da SI na produção de HV depende de pesquisa contínua e inovação tecnológica. A colaboração entre setores industriais, governos e instituições de pesquisa será vital para desenvolver e implementar essas tecnologias de forma eficaz.

6. PERSPECTIVAS FUTURAS

A presente dissertação também oferece perspectivas futuras com base nas análises realizadas e nas lacunas identificadas, propõem-se as seguintes direções para pesquisas futuras:

- Estudos de caso aplicados: investigar a viabilidade da integração entre si e hv em parques industriais específicos, especialmente no brasil, aproveitando o potencial das fontes renováveis disponíveis.
- Modelagem computacional e otimização: desenvolver modelos de simulação e ferramentas de otimização que avaliem fluxos de energia, materiais e subprodutos entre diferentes atores industriais visando maximizar a eficiência da cadeia de valor do HV.
- Avaliações econômicas e ambientais: realizar estudos de ACV e Análise de Custo-Benefício (ACB) comparando cenários com e sem SI na produção de HV.
- Governança e políticas públicas: Investigar o papel de instrumentos regulatórios, fiscais e financeiros na promoção de arranjos simbióticos voltados à transição energética, com foco em incentivos à produção e consumo de HV.
- Aplicações setoriais: explorar como setores específicos (como transporte, siderurgia, agroindústria ou saneamento) podem ser integrados em redes de si para produção e uso do HV, considerando suas particularidades logísticas e tecnológicas.
- Tecnologias habilitadoras: avaliar o papel de tecnologias como *blockchain*, inteligência artificial e IoT (*Internet of things*) na viabilização e rastreabilidade de fluxos simbióticos energéticos e materiais, otimizando a produção de HV em contextos industriais descentralizados.

6.1. Proposta de produção de hidrogênio verde via simbiose industrial no Brasil

O Brasil apresenta um cenário energético singular, com uma matriz predominantemente renovável e alto potencial para a integração de tecnologias sustentáveis. Com base na análise bibliométrica da dissertação, observa-se uma lacuna significativa na literatura sobre a aplicação integrada de SI e HV, especialmente em países em desenvolvimento como o Brasil. Aproveitando as vantagens competitivas do país como abundância de recursos hídricos, solares e biomassa propõe-se um modelo de produção de HV com base na SI, estruturado em torno de parques industriais ecoeficientes.

Este modelo seria implementado em regiões estratégicas, como o Nordeste e o Centro-Oeste, que combinam alta incidência solar, potencial eólico e disponibilidade de resíduos agroindustriais (biomassa e efluentes). A proposta envolve a criação de ecossistemas industriais colaborativos em que:

- Resíduos orgânicos de setores como agroindústria e saneamento são convertidos em biogás, que por sua vez alimenta processos de reforma a vapor ou eletrólise integrada;
- Energia elétrica renovável (solar, eólica ou hídrica) abastece eletrolisadores de alta eficiência, cujo calor residual e oxigênio gerado são utilizados por indústrias vizinhas, como fábricas de cimento ou papel e celulose;
- Sistemas digitais de monitoramento e *blockchain* são empregados para rastreabilidade, otimização logística e contratos inteligentes entre os parceiros da rede simbótica.

A proposta se alinha ao *roadmap* tecnológico identificado na dissertação, que prevê, em curto prazo, a consolidação de tecnologias TRL 6–7, e em médio prazo, a maturação de modelos integrados com maior autonomia energética e menor pegada de carbono. O modelo também responde às diretrizes da transição energética global, enfatizando a necessidade de políticas públicas específicas, incentivos fiscais, e a formação de redes de inovação envolvendo universidades, setor privado e governos locais.

7. REFERÊNCIAS

- ABAD AV, DODDS PE. Green hydrogen characterization initiatives: definitions, standards, guarantees of origin, and challenges. *Energy Policy*, v. 138, 111300, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.111300>.
- ARTIYASA, M.; MARDIYANA, D.; ISLAMI, L. A. Bibliometric green and hidrogen. BIO Web of Conferences. v. 148, n. 02032, p. 1-8, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1051/bioconf/202414802032>
- ARSAD, S. R.; KER, Pin Jern; HANNAN, M. A.; TANG, Shirley G. H.; NORHASYIMA, R. S.; CHAU, C. F.; MAHLIA, T. M. I. Patent landscape review of hydrogen production methods: Assessing technological updates and innovations. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 50, p. 447-472, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.09.085>.
- AFFERY AP, TAN JX, ONG IYB, LIM JY, YOO C, HOW BS, LING GGT, FOOD DCY. Optimal planning of inter-plant hydrogen integration (IPHI) in eco-industrial park with P-graph and game theory analyzes. *Process Safety and Environmental Protection*, v. 155, p. 197–218, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2021.08.016>.
- AID G, BRANDT N, LYSENKOVA M, SMEDBERG N. Looplocal – a heuristic visualization tool to support the strategic facilitation of industrial symbiosis. *Journal of Cleaner Production*, v. 98, p. 328–335, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.08.012>.
- AJANOVIC A, SAYER M, HAAS R. The economics and the environmental benignity of different colors of hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 47, p. 24136–24154, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.02.094>.
- AJEEB, W.; NETO, R. C.; BAPTISTA, P. Life cycle assessment of green hydrogen production through electrolysis: a literature review. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, v. 69, 103923, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2024.103923>.
- AKHTAR N, SAQIB Z, KHAN M, MARTIN M, ATIF S, ZAMAN M. A bibliometric analysis of contemporary research regarding industrial symbiosis: a path towards urban

environmental resilience. *Applied Ecology and Environmental Research*, v. 17, p. 1159–122, 2019. DOI: http://dx.doi.org/10.15666/aeer/1701_11591221.

AKYAZY T, GOTI A, BAYON F, KOHLGRUBER M, SCHODER A. Identifying the skills requirements related to industrial symbiosis and energy efficiency for the European process industry. *Environmental Sciences Europe*, v. 35, p. 1–22. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12302-023-00762-z>.

ALHASSAN M, JALIL A, NABGAN W, HAMID M, BAHARI M, IKRAM M. Bibliometric studies and impediments to valorization of dry reforming of methane for hydrogen production. *Fuel*, v. 328, 125240, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.125240>.

ALHUSSAN AA, EL-KENAWY E-SM, SAEED MA, IBRAHIM A, ABDELHAMID AA, EID MM, EL-SAID M, KHAFAGA DS, ABUALIGAH L, ELBAKSAWI O. Green hydrogen production ensemble forecasting based on hybrid dynamic optimization algorithm. *Frontiers in Energy Research*, v. 11, 1221006, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3389/fenrg.2023.1221006>

ALKA TA, RAMAN R, SURESH M. Research trends in innovation ecosystem and circular economy. *Discover Sustainability*, v. 5, 323, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s43621-024-00535-5>.

ALNAJEM M, MOSTAFA MM, ELMELEGY AR. Mapping the first decade of circular economy research: a bibliometric network analysis. *Journal of Industrial and Production Engineering*, p. 1–22. 2020 DOI: <https://doi.org/10.1080/21681015.2020.1838632>.

AMIN M, SHAH HH, FAREED AG, KHAN WU, CHUNG E, ZIA A, FAROOQI ZUR, LEE C. Hydrogen production through renewable and non-renewable energy processes and their impact on climate change. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 47, p. 33112–33134, 2022 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.07.172>.

ANNAN AM, LACKNER MA, MANWELL JF. Multi-objective optimization for an autonomous unmoored offshore wind energy system substructure. *Applied Energy*, v. 344, 121264, 2023 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.121264>.

ARCOS JMM, SANTOS DMF .The hydrogen color spectrum: techno-economic analysis of the available technologies for hydrogen production. *Gases*, v. 3, p. 25–46, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/gases3010002>.

AZADNIA AH, MCDAID C, ANDWARI AM, HOSSEIN SE. Green hydrogen supply chain risk analysis: a European hard-to-slaughter sectors perspective. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 182, 113371, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113371>.

BALDASSARRE B, SCHEPERS M, BOCKEN N, CUPPEN E, KOREVAAR G, CALABRETTA G. Industrial symbiosis: towards a design process for eco-industrial clusters by integrating circular economy and industrial ecology perspectives. *Journal of Cleaner Production*, v. 216, p. 446–460, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.091>.

BARHOUMI EM. Optimal design of standalone hybrid solar-wind energy systems for hydrogen-refueling station case study. *Journal of Energy Storage*, v. 74, 109546, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.109546>.

BOIX M, MONTASTRUC L, AZZARO-PANTEL C, DOMENECH S (2015) Optimization methods applied to the design of eco-industrial parks: a literature review. *Journal of Cleaner Production*, v. 87, p. 303–317. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.09.032>.

BORGES PT, SALES MB, GUIMARÃES CEC, SERPA JF, LIMA RKC, LOPES AAS, RIOS MAS, DESAI AS, LIMA AMS, LORA EES, SANTOS JCS (2024) Photosynthetic green hydrogen: Advances, challenges, opportunities, and prospects. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 49, p. 433–458. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.09.075>.

BORSCHIVER S, SILVA ALR (2016) *Technology Roadmap: planejamento estratégico para alinhar mercado-produto-tecnologia*. 1. ed. Rio de Janeiro: Interciênciac. ISBN 9788571933866.

BORETTI, Alberto. Geological hydrogen storage: Current status, research frontiers, and the path to large-scale deployment. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 134, p. 54-63, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2025.04.514>.

BOTELHO DF, LIMA FS, SOUSA RA, CAMPOS CA, NASCIMENTO JH (2024) Green hydrogen production from hydro spilled energy in Brazilian hydropower plants. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 68, p. 575–585. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.04.255>

BOURDIN S, TORRE A. Economic geography's contribution to understanding the circular economy. *Journal of Economic Geography*, v. 25, n. 2, p. 293–308, mar, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1093/jeg/lbae040>

BUKAR UA, SAYEEDA MS, RAZAKA SFA, YOGARAYANA S, AMODUB OA, MAHMOOD RA. A method for analyzing text using VOSviewer. *MethodsX*, v. 11, 102339, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mex.2023.102339>.

BUTTURI MA, GAMBERINI R (2022) The potential of hydrogen technologies for low-carbon mobility in the urban-industrial symbiosis approach. *International Journal of Energy Production & Management*, v. 7, p. 151–163. DOI: <https://doi.org/10.2495/EQ-V7-N2-151-163>.

CALADO G, CASTRO R. Hydrogen production from offshore wind parks: current situation and future perspectives. *Applied Sciences*, v. 11, 5561, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/app11125561>.

CAMARGO L, COMAS D, ESCORCIA YC, ALVIZ-MEZA A, CABALLERO GC, PORTNOY I. Bibliometric analysis of global trends around hydrogen production based on the Scopus database in the period 2011–2021. *Energies*, v. 16, 87, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16010087>.

CAO B, WANG L, ZHAO J, LIU Y, ZHANG H. Optimal scheduling of integrated energy network with electricity-hydrogen-storage considering ladder carbon trading mechanism. In: 4th International Conference on Power and Energy Technology (ICPET), 2022, Beijing, China. p. 910–915, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICPET55165.2022.9918319>.

CARVALHO MM, FLEURY A, LOPES AP (2013) An overview of the literature on technology roadmapping (TRM): contributions and trends. *Technological Forecasting & Social Change*, v. 80, p. 1418–1437. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2012.11.008>

CASTELLET-VICIANO L, HERNANDEZ-CHOVER V, BELLVER-DOMINGO A, HERNÁNDEZ-SANCHO F. Industrial symbiosis: a mechanism to guarantee the implementation of circular economy practices. *Sustainability*, v. 14, p. 15872 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/su142315872>.

CHENG W, LEE S. How green are the national hydrogen strategies? *Sustainability*, v. 14, n. 3, p. 1930. CHERTOW. Industrial symbiosis: literature and taxonomy. *Annual Review of Environment and Resources*, v. 25, p. 313–337, 2000. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev.energy.25.1.313>.

CHERTOW MR, KANAOKA KS, PARK J. Tracking the diffusion of industrial symbiosis scholarship using bibliometrics: comparing across Web of Science, Scopus, and Google Scholar. *Journal of Industrial Ecology*, v. 25, p. 913–931, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1111/jiec.13099>.

CHERTOW, MR. (2000). Industrial symbiosis: Literature and taxonomy. *Annual Review of Energy and the Environment*, 25(1), 313–337. <https://doi.org/10.1146/annurev.energy.25.1.313>.

CHRYSIKOPOLOUS SK, CHOUNTALAS PT, GEORGAKELLOS DA, LAGODIMOS AG (2024) Green certificates research: bibliometric assessment of current state and future directions. *Sustainability*, v. 16, p. 1129. DOI: <https://doi.org/10.3390/su16031129>.

CHU M, MUHAMAD HB, MUSTAPHA MB, SAN OT, ZAN F, JIA X. Research trends in corporate social responsibility and innovation: a bibliometric analysis. *Sustainability*, v. 14, 14185, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/su142114185>

COMISSÃO EUROPEIA. A hydrogen strategy for a climate-neutral Europe. Bruxelas, 2020. Disponível em: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_20_1259. Acesso em: 7 jun. 2025.

CONROW EH. Estimating Technology Readiness Level Coefficients. *Journal of Spacecraft and Rockets*, v. 48, n. 1, p. 190–192, jan./fev. 2011 DOI: <https://doi.org/10.2514/1.46753>.

- DAQUIN C, ALLAOUI H, GONCALVES G, HSU T. Centralized collaborative planning of an industrial symbiosis: mixed-integer linear model. *Computers & Industrial Engineering*, v. 180, 109171, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2023.109171>.
- DAVIS C, NIKOLIC I, DIJKEMA GPJ. Industrial Ecology 2.0. *Journal of Industrial Ecology*, v. 14, p. 707–726, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2010.00281.x>.
- DAWOOD F (2020) Hydrogen production for energy: an overview. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 45, p. 3847–3869. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.12.059>.
- DOU Y, SUN L, FUJII M, KIKUCHI Y, KANEMATSU Y, REN J. Towards a renewable-energy driven district heating system: key technology, system design and integrated planning. In: REN, J. (Ed.). *Renewable-energy-driven future*. Cambridge: Academic Press. p. 311–332, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820539-6.00010-8>.
- DOUTHU N, KUMAR S, MUKHERJEE D, PANDEY N, LIM WM. How to conduct a bibliometric analysis: an overview and guidelines. *Journal of Business Research*, v. 133, p. 285–296, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2021.04.070>.
- ELJACK F, KAZI MK. Prospects and challenges of green hydrogen economy via multi-sector global symbiosis in Qatar. *Frontiers in Sustainability*, v. 1, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3389/frsus.2020.612762>.
- ELLEGAARD O. The application of bibliometric analysis: disciplinary and user aspects. *Scientometrics*, v. 116, p. 181–202, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11192-018-2765-z>.
- FARAH S, BOKDE N, ANDRESEN GB. Cost and CO₂ emissions co-optimisation of green hydrogen production in a grid-connected renewable energy system. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 84, p. 164-176, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.08.062>.
- FAROUK AA, CHEW IML. Development of a simultaneous mass-water carbon-hydrogen-oxygen symbiosis network. *Sustainable Production and Consumption*, v. 28, p. 419-435, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.06.004>.

FERNÁNDEZ-ARIAS P, ANTÓN-SANCHO Á, LAMPROPOULOS G, VERGARA D. On Green hydrogen generation technologies: a bibliometric review. *Applied Sciences*, v. 14, 2524, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/app14062524>.

FRANKOWSKA M, BĄK I, FRANKOWSKI M, JASIULEWICZ J, KOZIOŁ P, MUSIAŁ W, SZARA A. Structural model of power grid stabilization in the green hydrogen supply chain system - conceptual assumptions. *Energies*, v. 15, 664, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15020664>.

FROWIJIN LSF, VAN SARK WGJHM. Analysis of photon-driven solar-to-hydrogen production methods in the Netherlands. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, v. 48, 101631, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101631>.

GARLET TB, SAVIAN FS, RIBEIRO JLD, SILUK JCM. Unlocking Brazil's green hydrogen potential: Overcoming barriers and formulating strategies to this promising sector. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 49, p. 553-570, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.09.227>.

GAYEN D, CHATTERJEE R, ROY S. A review on environmental impacts of renewable energy for sustainable development. *International Journal of Environmental Science and Technology*, v. 21, p. 5285–5310, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13762-023-05380-z>.

GE L, DONG X, PENG X, ZHANG Q. A review of hydrogen generation, storage, and applications in power system. *Journal of Energy Storage*, v. 75, 109307, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.109307>.

GEHRKE P, GORETTI AAT, AVILA LV. Impacts of the energy matrix on Brazilian sustainable development. *UFSM Administration Magazine*, v. 14, p. 1032-1049, 2021. DOI: <https://doi.org/10.5902/1983465964409>.

GHISELINI P, CIALANI C, ULGIATI S. A review on circular economy: the expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems. *Journal of Cleaner Production*, v. 114, p. 11-32, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.007>.

GOREN AY, DINÇER I, KHALVATI A. Evaluation of environmental impacts of hydrogen production technologies: biomass, water, and fossil fuel. 11th Global Conference on

Global Warming (GCGW-2023). DOI: <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4658889>. Acesso em: 04 abr. 2024.

GRANT GB, SEAGER TP, MASSARD G, NIES L. Information and Communication Technology for Industrial Symbiosis. *Journal of Industrial Ecology*, v. 14, p. 740-753, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2010.00273.x>.

HAMMI Z, AHMED U, ALSHAMMARI YM, ALJAFARI MA, ALSHAMMARI MA, ALMASOUD SA, ALAWAD AA, ALSHAMMARI NH. Green hydrogen: a holistic review covering life cycle assessment, environmental impacts, and color analysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 80, p. 1030-10450, 2024 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.07.008>.

HAQ H, VÄLISUO P, NIEMI S (2021) Modelling Sustainable Industrial Symbiosis. *Energies*, v. 14, 1172 , 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/en14041172>.

HASSAN Q, ALGBURI S, SAMEEN AZ, SALMAN HM, AL-JIBOORY AK. A review of green hydrogen production by renewable resources. *Energy Harvesting and Systems*, v. 11, n. 1, 20220127, 2024.DOI: <https://doi.org/10.1515/ehs-2022-0127>

HECK J, UTIKAL H, LEKER J. Industrial symbiosis as enabler and barrier for defossilization: the case of Höchst Industrial Park. *Environmental Technology & Innovation*, v. 36, 103850, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eti.2024.103850>.

HUANG, H.; CHEN, S.; ZOU, D.; LI, X.; ZHANG, W. A systematic review of methods and applications for technology opportunity discovery using patent data. *Scientometrics*, v. 128, n. 1, p. 19-48, 2023. DOI: 10.1007/s11192-022-04535-6.

HERTWIG M, BOGDANOV I, BECKETT M, WALTERSMANN L, LENTES J. Symbiotic loss-free industrial production in ultra-efficient urban industrial parks. *Procedia CIRP*, v. 98, p. 637-642, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.01.167>.

HUANG YS, LIU SH. Chinese green hydrogen production potential development: a provincial case study. *IEEE Access*, v. 8, p. 171968-171976, 2020 DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3024540>.

IEA (2024) *Global hydrogen review 2024*. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2024>. Acesso em: 05 abr. 2025.

INCER-VALVERDE J, KORAYEM A, TSATSARONIS G, MOROSUK T. "Colors" of hydrogen: definitions and carbon intensity. *Energy Conversion and Management*, v. 291, 117294, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.117294>.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (2019) *The Future of Hydrogen: Seizing Today's Opportunities*. Paris: IEA. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>. Acesso em: 07 jun. 2025.

IPEA (2022) *Hydrogen panorama in Brazil*. Disponível em: https://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/11291/1/td_2787_web.pdf. Acesso em: 04 abr. 2024.

ISMAIL Y. Potential benefit of industrial symbiosis using life cycle assessment. *Journal of Physics: Conference Series*, v. 1625, 012054, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1625/1/012054>.

IYER RK, KUMAR G, SARAVANAN R, KUMAR S, KUMAR A, SUGUMARAN K. Life-cycle analysis of hydrogen production from water electrolyzers. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 81, p. 1467-1478 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.06.355>.

IYER SV, SANGWAN KS, DHIRAJ. Development of an Industrial Symbiosis Framework through Digitalization in the Context of Industry 4.0. *Procedia CIRP*, v. 122, p. 515-520, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2024.01.075>.

JACOBSEN NB. Industrial Symbiosis in Kalundborg, Denmark: A Quantitative Assessment of Economic and Environmental Aspects. *Journal of Industrial Ecology*, v. 10, n. 1-2, p. 239–255, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1162/108819806775545411>.

JARADAT M, AL-HAMAMREH M, AL-ADWAN H, KHASAWNEH B, KHASHASHNEH S, JARADAT A, ALZOUBI M, ALSHAMAILEH N. Green hydrogen in focus: a review of production technologies, policy impact, and market developments. *Energies*, v. 17, 3992, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/en17163992>.

JÄRVENPÄÄ A-M, SALMINEN V, KANTOLA J. Industrial Symbiosis, Circular Economy and Industry 4.0 – A Case Study in Finland. *Management and Production Engineering Review*, v. 12, p. 111-121, 2021. DOI: <https://doi.org/10.24425/mper.2021.139999>.

JAYACHANDRAN M, AWASTHI A, ZLATANOVIC N, SINGH P, KUMAR S, KUMAR A. Challenges and opportunities in green hydrogen adoption for decarbonizing hard-to-abate industries: a comprehensive review. *IEEE Access*, v. 12, p. 1–35, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3363869>

KABIR E, KUMAR P, KUMAR S, ADELODUN AA, KIM KH. Solar energy: potential and future prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 82, p. 894–900, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.094>.

KARAK, HARICHANDANA, ROY B. Bibliometric analysis of the research on hydrogen economy: an analysis of current findings and roadmap ahead. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 47, p. 10803-10824, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.01.137>.

KARACA AE, DINCER I. Design and experimental investigation of a new photoelectrochemical reactor for green hydrogen production. *Chemical Engineering Science*, v. 265, 118181, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ces.2022.118181>.

KARAYEL GK, JAVANI N, DINCER I. Hydropower for green hydrogen production in Turkey. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 48, n. 60, p. 22806–22817, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.04.084>

KARNE H, MAHAJAN U, KETKAR U, KOHADE A, KHADILKAR P, MISHRA A. A review on biogas upgradation systems. *Materials Today: Proceedings*, v. 72, p. 775–786, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.09.015>.

KHAN SAR, TABISH M, YU Z. Mapping and visualizing of research output on waste management and green technology: A bibliometric review of literature. *Waste Management & Research*, v. 41, n. 7, p. 1203-1218, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1177/0734242X221149329>.

KORÁNYI TI, NÉMETH M, BECKE A, HORVÁTH A. Recent advances in methane pyrolysis: Turquoise hydrogen with solid carbon production. *Energies*, v. 15, 6342, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15176342>.

KORHONEN J, HONKASALO A, SEPPÄLÄ J. Circular economy: the concept and its limitations. *Ecological Economics*, v. 143, p. 37-46, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2017.06.041>.

KOWALSKI Z, KULCZYCKA J, MAKARA A, MONDELLO G, SALOMONE R. Industrial Symbiosis for Sustainable Management of Meat Waste: The Case of Śmiłowo Eco-Industrial Park, Poland. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, v. 20, 5162, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph20065162>.

LEE D, CHO S, JANG S, RA Y, JANG Y, YUN Y, CHOI D (2022) Toward effective irregular wind energy harvesting: Self-adaptive mechanical design strategy of triboelectric-electromagnetic hybrid wind energy harvester for wireless environmental monitoring and green hydrogen production. *Nano Energy*, v. 102, p. 107638. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2022.107638>.

LEPAGE T, KAMMOUN M, SCHMETZ Q, RICHEL A. Biomass-to-hydrogen: a review of main production routes, processes evaluation and techno-economical assessment. *Biomass and Bioenergy*, v. 144, 105920, 2021 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105920>.

LINARES, IMP; PAULO, AF; PORTO, GS. Patent-based network analysis to understand technological innovation pathways and trends. *Technology in Society*, v. 59, p. 101134, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2019.04.010>.

LI J, HU S, ZHAO P, LIN Y, ZHANG Q, ZHAO W. Optimal sizing for a wind-photovoltaic-hydrogen hybrid system considering levelized cost of storage and source-load interaction. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 48, n. 11, p. 4129–4142, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.10.271>.

LÜTJE A, WOHLGEMUTH V. Engenharia de requisitos para uma ferramenta de simbiose industrial para parques industriais, abrangendo análise de sistemas, simulação de transformação e definição de metas. *Administrative Sciences*, v. 10, n. 1, p. 10, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/admsci10010010>

MACIEL LBB, MELLO AC, ALMEIDA LSS, SILVA JSF, CAVALCANTE JJV, MEDEIROS ML. Environmental studies of green hydrogen production by electrolytic process: a comparison of the use of electricity from solar PV, wind energy, and hydroelectric plants. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 48, n. 93, p. 36584–36604, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.05.334>

MALLAWAARACHCHI H, SANDANAYAKE Y, KARUNASENA G, LIU C. Unveiling the conceptual development of industrial symbiosis: Bibliometric analysis. *Journal of*

Cleaner Production, v. 258, 120618, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120618>

MALUENDA M, CÓRDOVA S, LORCAA, NEGRETE-PINCETIC M. Optimal operation scheduling of a PV-BESS- Electrolyzer system for hydrogen production and frequency regulation. *Applied Energy*, v. 344, 121243, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.121243>

MANISCALCO MP, GALATI S, BASILE A. Critical review of life cycle assessment of hydrogen production pathways. *Environments*, v. 11, 108, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/environments11060108>.

MARINELLI S, BUTTURI MA, RIMINI B, GAMBERINI R, MARINELLO S. Evaluating the environmental benefit of energy symbiosis networks in ecoindustrial. *IFAC-PapersOnLine*, v. 53, p. 13082–13087, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2020.12.2260>

MARTIN M, HARRIS S. Prospecting the sustainability implications of an emerging industrial symbiosis network. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 138, p. 246–256, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.07.026>

MARTINS PHS, SERRANO ALM, RODRIGUES GAP, VERGARA GF, SAIKI GM, BORGES RV, BISPO GD, PEIXOTO MGM, GONÇALVES VP. Brazil's New Green Hydrogen Industry: An Assessment of Its Macroeconomic Viability Through an Input–Output Approach. *Economies*, v. 12, 333, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/economies12120333>

MENG S, WU X, LI H, WU Y. Trajectory mapping and future charting of hydrogen energy policy: A systematic review. *Expert Systems*, e13696, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1111/exsy.13696>.

McKone, J. R. Lewis, N. S, Gray, H. B. Will solar-driven water-splitting devices see the light of day? *Chemistry of Materials*, 26(1), 407–414, 2013. <https://doi.org/10.1021/cm4021802>.

MICROSOFT (2025) *Microsoft Visio – Criação de diagramas profissionais*. Disponível em: <https://www.microsoft.com/pt-br/microsoft-365/visio/>. Acesso em: 06 maio 2025.

MOORHOUSE DJ (2002) Detailed Definitions and Guidance for Application of Technology Readiness Levels. *Journal of Aircraft*, v. 39, n. 1, p. 190. DOI: <https://doi.org/10.2514/2.2916>

MORTENSEN L, KØRNØV L. Critical factors for industrial symbiosis emergence process. *Journal of Cleaner Production*, v. 212, p. 56-69, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.222>.

MUDAROV N. Low to near-zero CO₂ production of hydrogen from fossil fuels: status and perspectives. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 42, p. 14058–14088, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.04.101>.

NADALETI WC, DOS SANTOS GB, LOURENÇO VA, KLIEMANN B, SILVA LA, ROSA LPR. Green hydrogen-based pathways and alternatives: towards the renewable energy transition in South America's regions – Part B. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 47, n. 1, p. 1–15, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.05.113>

NADALETI WC, DOS SANTOS GB, LOURENÇO VA. Integration of renewable energies using the surplus capacity of wind farms to generate H₂ and electricity in Brazil and in the Rio Grande do Sul state: energy planning and avoided emissions within a circular economy. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 45, p. 24190-24202, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.06.226>.

NAQVI AA, NADEEM TB, AHMED A, BUTT FA. Utilization of solar energy for the production of green hydrogen from photovoltaic powered electrolyzer. *Journal of Testing and Evaluating*, v. 52, p. JTE20230173 ,2024. DOI: <https://doi.org/10.1520/JTE20230173>

NERI A, SAVIAN F, BUTTURI MA, SILUK JCM, CAGNIN N. Enhancing waste-to-energy and hydrogen production through urban–industrial symbiosis: a multi-objective optimization model incorporating a bayesian best-worst method. *Smart Cities*, v. 7, p. 735-757, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/smartcities7020030>.

NEVES A, GODINA R, AZEVEDO SG, MATIAS A. A comprehensive review of industrial symbiosis. *Journal of Cleaner Production*, v. 247, 119113, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119113>.

NIKOLAIDIS P, POULLIKKAS A. A comparative overview of hydrogen production processes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 67, p. 597–611, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.044>.

OKONKWO PC, OKAFOR U, UKPO G, OKOROIGWE EC, OMAKA O, EGWUATU CI, NDUKA U. Techno-economic analysis and optimization of solar and wind energy systems for hydrogen production: a case study. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, v. 44, p. 9119–9134, 2022 DOI: <https://doi.org/10.1080/15567036.2022.2129875>.

OSMĀ IA, ABUKHALAF SA, SAIDAN M, AL-HAMAMREH M, AL-ADWAN H. Life cycle assessment of hydrogen production, storage, and utilization toward sustainability. *WIREs Energy and Environment*, v. 13, e526, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1002/wene.526>.

PAJAK M, BRUS G, KINIJIMA S, SZMYD JS. Enhancing hydrogen production from biogas through catalyst rearrangements. *Energies*, v. 16, 4058, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16104058>.

PANCHENKO VA, DAUS YV, KOVALEV AA, YUDAEV IV, LITTI YV. Prospects for the production of green hydrogen: review of countries with high potential. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 48, p. 4551-4571, 2023 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.10.084>.

PANG K, LIEW PY, WOON KS, SHIN HW, AALWI SRW, KLEMÉS JJ. Optimization of renewable-based multi-energy system with hydrogen energy for urban-industrial symbiosis. *Chemical Engineering Transactions*, v. 88, p. 199-204, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3303/CET2188033>.

PATEL K, SINGH SK. Environmental sustainability analysis of biofuels: a critical review of LCA studies. *Clean Technologies and Environmental Policy*, v. 25, p. 2489–2510, 2023 DOI: <https://doi.org/10.1007/s10098-023-02596-y>.

PEIN M, NEUMANN NC, VENSTROM LJ, VIETEN J, ROEB M, SATTLER C Two-step thermochemical electrolysis: An approach for green hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 46, p. 24909-24918, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.05.036>.

PERRUCCI DV, DETTMANN D, DEAK D, LI J. A review of international eco-industrial parks for implementation success in the United States. *City and Environment Interactions*, v. 16. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cacint.2022.100086>

PHAAL R, FARRUKH CJP, PROBERT DR. Technology roadmapping—A planning framework for evolution and revolution. *Technological Forecasting & Social Change*, v. 71, p. 5–26, 2004. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0040-1625\(03\)00072-6](https://doi.org/10.1016/S0040-1625(03)00072-6)

PRANCKUTE R. Web of Science (WoS) and Scopus: The titans of bibliographic information in today's academic world. *Publications*, v. 9, p. 12, 2021 DOI: <https://doi.org/10.3390/publications9010012>.

QIN Y, XU Z, WANG X, ŠKARE M. Green energy adoption and its determinants: A bibliometric analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 153, 111780, 2022 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111780>.

RAMAN R, JAYARAMAN K, RAMAMURTHI V, SANTHOSH R, SARAVANAN A, SUGUMARAN K. Green-hydrogen research: what have we achieved, and where are we going? *Bibliometrics analysis*. *Energy Reports*, v. 8, p. 9242-9260, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.07.058>.

RAMOS MA, FARDUS MJ, KHAIRUDDIN NK, HARUN N, HASSAN MM, KAMAL AA, RAHMAN MM. Development of a multi-leader multi-follower game to design industrial symbioses. *Computers & Chemical Engineering*, v. 183, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2024.108598>.

RATNAKAR RR, GUPTA N, ZHANG K, DOORNE C, FESMIRE J, DINDORUK B, BALAKOTAIAH V. Hydrogen supply chain and challenges in large-scale LH₂ storage and transportation. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 46, p. 24149-24168 ,2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.05.025>

RAZZHIVIN IA, ANDREEV MV, KIEVEC AV. Increasing the stability of hydrogen production in the wind energy-hydrogen system through the use of synthetic inertia of the wind turbine. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 47, p. 38495–38505 , 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.09.060>.

RISSMAN J, BATAILLE C, MASANET E, DE LA RUE DU CAN S, MARING L, WILLIAMS E, GOLDEN JS. Technologies and policies to decarbonize global industry:

Review and assessment of mitigation drivers through 2070. *Applied Energy*, v. 266, 114848, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114848>.

ROCHA GV, MELLO CHP. How to develop technology roadmaps? The case of a Hospital Automation Company. *Production*, São Paulo, v. 26, n. 2, p. 345–358, abr./jun, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1590/0103-6513.173614>.

RODRÍGUEZ-ABURTO C, POMA-GARCÍA J, MONTAÑO-PISFIL J, MORCILLO-VALDIVIA P, OYANGUREN-RAMIREZ F, SANTOS-MEJIA C, RODRIGUEZ-FLORES R, VIRÚ-VASQUEZ P, PILCO-NUÑEZ A. Bibliometric Analysis of Global Publications on Management, Trends, Energy, and the Innovation Impact of Green Hydrogen Production. *Sustainability*, v. 16, 11048, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/su162411048>

RUSMANIS D, KLINTS M, BLUMBERGA D. Electrofuels in a circular economy: A systems approach towards net zero. *Energy Conversion and Management*, v. 292, 117367, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.117367>.

SAAVEDRA YMB, IRITANI DR, PAVAN ALR, OMETTO AR. Theoretical contribution of industrial ecology to circular economy. *Journal of Cleaner Production*, v. 170, p. 1514-1522, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.09.260>

SORRENTI I, ZHENG Y, SINGLITICO A, SHI Y. Low-carbon and cost-efficient hydrogen optimization through a grid-connected electrolyser : The case of GreenLab skive. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 171: 113033, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.113033>

SAFRONOVA A, BARISA A (2023) Hydrogen Horizons: A Bibliometric Review of Trends in Diverse Emission Sectors. *Sustainability*, v. 15, p. 14355. DOI: <https://doi.org/10.3390/su151914355>.

SAVIAN F, SELITO M, NERI A, SILVA T, OLIVEIRA HLS, BUTTURI MA (2023) Green hydrogen, industrial symbiosis, and blockchain: enhancing sustainability and resilience in supply chains. DOI: <https://doi.org/10.7148/2023-0350>

VICARIO, E.; BANDINELLI, R.; FANI, V.; MASTROIANNI, M. (Eds.). *Proceedings, European Council for Modeling and Simulation, ECMS 2023*. s.l.: ECMS, 2023. p. 350-356. DOI: <https://doi.org/10.7148/2023-0350>.

SCHLÜTER L, MILANI A (2018) *An ecosystem analysis of industrial symbiosis development in Aalborg, Denmark*. Dissertaçāo (Mestrado) — Aalborg University, Aalborg.

Disponível

em:

https://vbn.aau.dk/ws/portalfiles/portal/422598510/Aalborgsymbiosis_schluetermilani2018.pdf Acesso em: 14/04/2025

SUN, B.; ZHANG, M.; SUN, Q. et al. Revisão sobre a segurança de poços de hidrogênio natural. *Nature Communications*, v. 16, p. 369, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-024-55773-y>.

SEO, W. A patent-based approach to identifying potential technology opportunities realizable from a firm's internal capabilities. *Computers & Industrial Engineering*, v. 171, p. 108395, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2022.108395>.

SIMÕES JCT, JÚNIOR SV (2024) Industrial symbiosis concept applied to green hydrogen production: a critical review based on bibliometric analysis. *Discover Sustainability*, v. 5, p. 504. DOI: <https://doi.org/10.1007/s43621-024-00780-8>.

SONG B, YEO Z, KOHLS P, HERRMANN C (2019) Industrial symbiosis: exploring big-data approach for waste stream discovery. *Procedia CIRP*, v. 61, p. 353-358. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.11.245>.

SORRENTI I, ZHENG Y, SINGLITICO A, SHI Y (2023) Low-carbon and cost-efficient hydrogen optimization through a grid-connected electrolyser: The case of GreenLab Skive. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 171, p. 113033. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.113033>.

SUN Y, LONG Y, SU F, CAI L, ZHANG Y (2024) Evolutionary characteristics of industrial parks from a carbon neutrality perspective. *Sustainability*, v. 16, n. 14, p. 6065. DOI: <https://doi.org/10.3390/su16146065>

TAMALA JK, MARAMAG EI, SIMEON KA, IGNACIO JJ (2022) A bibliometric analysis of sustainable oil and gas production research using VOSviewer. *Cleaner Engineering and Technology*, v. 7, p. 100437. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.clet.2022.100437>.

TSENG ML, TAN RR, CHIU ASF, CHIEN CF, KUO TC (2018) Circular economy meets industry 4.0: Can big data drive industrial symbiosis? *Resources, Conservation and Recycling*, v. 131, p. 146-147. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.12.028>.

- UNIDO (2023) *Applications of Green Hydrogen in Eco-Industrial Parks Best Practice Series*. Disponível em: https://hub.unido.org/sites/default/files/publications/2023_BPS%204%20Green%20Hydrogen%20Applications%20in%20Industrial%20Parks.pdf. Acesso em: 04 abr. 2024.
- VAZ JR S (2020) *Use of agro-industrial waste: a sustainable approach*. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/217434/1/S-VAZ-Aproveitamento-de-residuos-agroindustriais.pdf>. Acesso em: 04 abr. 2024.
- VEZA I, IDRIS M, FATTAH IMDR (2022) Circular economy, energy transition, and role of hydrogen. *Mechanical Engineering for Society and Industry*, v. 2, p. 54–56. DOI: <https://doi.org/10.31603/mesi.7134>.
- VIDONI, Oliviero Giacomo. Patent Landscape on Hydrogen Technologies: a study on the generality and originality of hydrogen patents. 2023. 121 p. (Master Thesis in Engineering and Management) – Politecnico di Torino, Torino, 2023. Disponivel em : <https://webthesis.biblio.polito.it/28004/1/tesi.pdf> Acesso em: 10/06/2025
- WADSTRÖM C, JOHANSSON M, WALLÉN M (2021) A framework for studying outcomes in industrial symbiosis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 151, p. 111526. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111526>.
- WANG S, JIA S, ZHOU Q, ZHANG L, SUN Q, SUN H, TIAN Y, LIU Y (2022) Numerical assessment of a hybrid energy system based on solid oxide electrolyzer, solar energy and molten carbonate fuel cell for the generation of electrical energy and hydrogen fuel with electricity storage option. *Journal of Energy Storage*, v. 54, p. 105274. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.105274>.
- WEI J, ZHANG M, LU H, FU Q, XIAO C, HU W, LI H, CHEN Z, PAN Y (2024) Sequential oxygen evolution and decoupled water splitting via electrochemical redox reaction of nickel hydroxides. *Nature Communications*, v. 15, p. 9012. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-024-53310-5>.
- XU X, ZHOU Q, YU D (2022) The future of hydrogen energy: Bio-hydrogen production technology. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 47, p. 33677–33698. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.07.261>.

YAN X, WANG L, FANG M, HU J (2023) How Can Industrial Parks Achieve Carbon Neutrality? Literature Review and Research Prospect Based on the CiteSpace Knowledge Map. *Sustainability*, v. 15, p. 372. DOI: <https://doi.org/10.3390/su15010372>.

YAN Y, SONG D, ZHU X, PENG X, ZHANG Q (2021) Roadmap to hybrid offshore system with hydrogen and power co-generation. *Energy Conversion and Management*, v. 247, p. 114690. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114690>.

YANG Q, TIAN S, ZHANG X, LI Z, SONG T, XU X (2024) Machine learning-based techno-econo-environmental analysis of CO₂-to-olefins process for screening the optimal catalyst and hydrogen color. *Energy*, v. 312, p. 133508. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.133508>.

YEO Z, MASI D, LOW JS, NG YT, TAN PS, BARNES S (2019) Tools for promoting industrial symbiosis: a systematic review. *Journal of Industrial Ecology*, v. 23, p. 1087-1108. DOI: <https://doi.org/10.1111/jiec.12846>.

ZHANG J, QIAO Q, LIU J (2025) Avaliação do potencial de redução de emissões de carbono da simbiose industrial em parques industriais. *Clean Technologies and Environmental Policy*. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10098-025-03154-4>.

ZHANG W, LI B, XUE R, WANG C, CAO W (2021) A systematic bibliometric review of clean energy transition: Implications for low-carbon development. *PLoS ONE*, v. 16. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0261091>

ZHAO YJ, LIU H, GUO X, WANG X, LIU Q, ZHANG K, ZHANG Q (2022) A multi-dimensional feasibility analysis of coal to methanol assisted by green hydrogen from a life cycle viewpoint. *Energy Conversion and Management*, v. 268, p. 115992. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115992>.

ZHOU X, WU J, MA L, HU W, ZHANG H (2024) The impact of digital infrastructure on industrial ecology: evidence from broadband China strategy. *Journal of Cleaner Production*, v. 447. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141589>

ZUPIC I, ČATER T (2015) Bibliometric methods in management and organization. *Organizational Research Methods*, v. 18, p. 429-472. DOI: <https://doi.org/10.1177/1094428114562629>.

8. ANEXOS

ANEXO A – Artigo previamente publicado em 2024 referente aos dados bibliométricos obtidos na pesquisa

Discover Sustainability

Review

Industrial symbiosis concept applied to green hydrogen production: a critical review based on bibliometric analysis

José Cláudio Trindade Simões¹ · Silvio Vaz Júnior^{1,2}

Received: 16 September 2024 / Accepted: 17 December 2024

Published online: 20 December 2024

© The Author(s) 2024 [OPEN](#)

Abstract

The use of fossil fuels has generated large amounts of greenhouse gas (GHG) emissions into the atmosphere, resulting in harmful environmental impacts. Faced with this situation, it is necessary to search for new sources of energy and fuels to mitigate the adverse effects of this excessive use and create opportunities for a cleaner energy transition. In this context, the production of green hydrogen (GH) stands out as an effective and more sustainable alternative, although it still faces obstacles to its wider use. These challenges can be solved with the application of industrial symbiosis (IS). The objective of this review was to identify the scenario and understand the application of the IS concept in GH production. To achieve this purpose, a bibliometric review of publications indexed in Scopus was carried out, also seeking to identify global positions in relation to the use of this technological approach. The results indicate that the theme presents emerging characteristics, such as the low concentration of data in a single author or country, characterizing a developing study concept.

✉ Silvio Vaz Júnior, silvio.vaz@embrapa.br | ¹Graduate Program of Biofuels, Federal University of Uberlândia, Campus Santa Mônica, Av. João Naves de Ávila, 2121, Uberlândia, MG 38400-902, Brazil. ²Brazilian Agricultural Research Corporation, Parque Estação Biológica, Av. W3 Norte, S/N, Asa Norte, Brasília, DF 70770-901, Brazil.



ANEXO B – Boletim de pesquisa e desenvolvimento publicado em 2024 que também abrange a metodologia bibliométrica.



Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento

e-ISSN 2177-0395

30

Brasília, DF / Setembro, 2024

Levantamento bibliométrico de um modelo de simbiose industrial para produção de hidrogênio verde no Brasil

Silvio Vaz Júnior⁽¹⁾ e José Cláudio Trindade Simões⁽²⁾

⁽¹⁾Pesquisador, Embrapa Agroenergia, Brasília, DF. ⁽²⁾Engenheiro de Produção, Mestrando em Biocombustíveis (PPBIO) da Universidade Federal de Uberlândia, MG.



Resumo – A utilização dos combustíveis fósseis tem gerado grandes quantidades de emissões de gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera, produzindo impactos ambientais nocivos ao meio ambiente. Desse modo, novas fontes de geração de energia e combustíveis são necessárias para mitigar os efeitos adversos desse uso excessivo e também criar oportunidades para uma transição energética mais limpa. Este trabalho buscou identificar o cenário de pesquisa, desenvolvimento e inovação (PD&I) que compreende o uso da simbiose industrial para a produção de hidrogênio verde por meio de um levantamento bibliométrico. Ademais, buscou identificar o posicionamento do Brasil frente ao uso desse tipo de tecnologia, destacando todos os fatores internos e externos por meio da análise SWOT (Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats: Forças, Fraquezas, Oportunidades, Ameaças). Nesse sentido, foi possível observar que o Brasil está em desvantagem quando comparado a países como China, Alemanha e Estados Unidos, em razão de falta de investimento e infraestrutura adequada, pouca prioridade política e recursos limitados para pesquisa e desenvolvimento na área. No entanto, o País apresenta boas perspectivas para implementação de um ambiente favorável de PD&I para promoção do avanço de projetos e tecnologias no tema em consequência de sua matriz energética com abundância de fontes de energias renováveis.

Termos para indexação: gases de efeito estufa, economia circular, combustíveis renováveis, descarbonização.

Bibliometric survey of an industrial symbiosis model for green hydrogen production in Brazil

Abstract – The use of fossil fuels has generated large amounts of greenhouse gas (GHG) emissions into the atmosphere, producing harmful environmental impacts. Therefore, new sources of energy generation and fuels are needed to mitigate the adverse effects of this excessive use and create opportunities for a cleaner energy transition. This study sought to identify the research, development and innovation (RD&I) scenario that includes the use of industrial symbiosis for the production of green hydrogen by means of a bibliometric survey. In addition, it sought to identify Brazil's position in relation to the use