

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

Embrapa Agroenergia
Parque Estação Biológica (PqEB),
s/nº
Ed. Embrapa Agroenergia
Caixa Postal 40315
CEP 70770-901, Brasília, DF
www.embrapa.br/agroenergia
www.embrapa.br/fale-conosco/sac

Comitê Local de Publicações

Presidente

Juliana Evangelista da Silva
Rocha

Secretária-executiva

Lorena Costa Garcia Calsing

Membros

Alexandre Nunes Cardoso, Diogo
Keiji Nakai, João Ricardo Moreira
de Almeida, Leonardo Fonseca
Valadares, Lívia Teixeira Duarte
Brandão, Priscila Seixas Sabaini
e Sílvia Belém GonçalvesEdição executiva e revisão de
texto

Antonio Claudio da Silva Barros

Normalização bibliográfica
Fábio Lima Cordeiro (CRB-
1/1763)

Projeto gráfico

Leandro Sousa Fazio

Diagramação

Maria Goreti Braga dos Santos

Publicação digital: PDF

Todos os direitos
reservados à Embrapa.

of this type of technology, highlighting all the internal and external factors by means of a SWOT analysis. In this sense, it was possible to observe that Brazil is at a disadvantage when compared to countries such as China, Germany and the United States due to a lack of investment and adequate infrastructure, low political priority and limited resources for research and development in the area. However, the country has good prospects for implementing a favorable RD&I environment to promote the advancement of projects and technologies in this area because of its energy matrix with an abundance of renewable energy sources.

Index terms: greenhouse gases, circular economy, renewable fuels, decarbonization.

Introdução

O avanço tecnológico tem impulsionado o crescimento das atividades industriais globalmente, resultando em um aumento proporcional no consumo de recursos naturais e na demanda por energia para alimentar processos de produção, máquinas e infraestrutura (Marinelli et al., 2020). O modelo econômico que caracteriza essa estrutura de consumo é linear e unidirecional, baseando-se na sequência de extrair, produzir, usar e descartar, não sendo o fluxo deste modelo sustentável, em razão do alto consumo dos recursos naturais e da poluição causada pela geração de resíduos e emissão de gases de efeito estufa (GEE) (Viciano et al., 2022).

Têm-se desenvolvido novas alternativas para reduzir os efeitos negativos ao meio ambiente. Sob essa perspectiva, a economia circular (EC) surge como uma abordagem conceitual que busca reduzir os impactos ambientais em conjunto com a ecologia industrial (EI). Um dos princípios fundamentais da EC é a EI, que procura limitar o impacto das indústrias no meio ambiente, promovendo a colaboração entre elas por meio da simbiose industrial (SI) (Daquin et al., 2023).

A SI é um conceito amplamente debatido no desenvolvimento de ecoindústrias, com o objetivo de maximizar a conservação de recursos e a redução de emissões de GEE por meio da troca de subprodutos entre diferentes indústrias. Essa abordagem é específica para projetar o fluxo de material e energia entre as indústrias, considerando as perspectivas da engenharia de sistemas (Dou et al., 2021).

Outras possibilidades vêm sendo estudadas em paralelo ao conceito de SI com o objetivo de complementar as estratégias de preservação do meio ambiente visando reduzir a utilização descontrolada

de recursos naturais e a redução das emissões de GEE (Hertwig et al., 2021). Nos estudos de Pein et al. (2021), é destacado que uma das alternativas dentro desse escopo é a utilização do hidrogênio verde (HV), pois ele possui a capacidade de criar um ciclo sustentável na geração de energia renovável, sendo considerado um combustível potencialmente livre de carbono, e sua utilização pode desempenhar um papel importante na descarbonização efetiva – ou mitigação da emissão de gás carbônico – de vários setores econômicos.

Para desempenhar esse papel fundamental, é necessário um caminho para produzir hidrogênio sem o uso de combustíveis fósseis como matéria-prima e/ou insumo. No entanto, utilizar fontes de energia renováveis possui limitações que desaceleram o andamento da produção de hidrogênio, especialmente para a categoria verde, sobretudo do ponto de vista econômico (Ishaq; Dincer; Crawford, 2022). Existem oportunidades para superar estas limitações, especialmente em parques ecoindustriais que envolvem um grupo de instalações que cooperam por meio da troca de materiais e energia (Panu et al., 2019).

Em comparação com os processos produtivos convencionais de hidrogênio em relação ao HV, verifica-se uma alta emissão de GEE na atmosfera partindo dos processos convencionais. A produção mundial de hidrogênio é de aproximadamente 70 Mt, sendo que 76% são obtidos a partir de gás natural, e a maior parte do restante (23%) é proveniente do carvão mineral. Essa forma de produção do hidrogênio resulta na emissão de aproximadamente 830 Mt CO₂ por ano, o que equivale às emissões anuais de CO₂ da Indonésia e do Reino Unido combinadas (International Energy Agency, 2023).

Um forte vetor no campo da geração de energia limpa, países emergentes, como o Brasil, estão buscando se posicionar no mercado de energia por meio do HV. O Brasil tem uma posição de destaque para se tornar um grande exportador de hidrogênio de baixo carbono, por apresentar condições climáticas favoráveis para a geração de energia elétrica por meio de fontes eólicas, solar e hídras (Oliveira, 2022).

As pesquisas sobre modelos de SI demonstram um grande potencial a ser explorado, observando-se que o conceito já é uma tendência, pelas respostas positivas para o desenvolvimento socioambiental e econômico. Além disso, vem se destacando dentro do cenário de pesquisas acadêmicas (Neves et al., 2020). Proporcionalmente, os estudos sobre HV demonstram-se promissores, pelo potencial de ele ser

o principal vetor para uma futura transição energética (Drela et al., 2021).

Nesse sentido, este levantamento bibliométrico teve por objetivo identificar as principais tendências de pesquisa, desenvolvimento e inovação (PD&I) sobre a utilização do conceito de SI aplicado à produção de HV, além de avaliar os aspectos internos e externos relacionados ao Brasil utilizando a matriz SWOT (Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats: Forças, Fraquezas, Oportunidades, Ameaças). O levantamento justifica-se pela necessidade de explorar a literatura científica para conhecer os cenários de PD&I sobre o conceito de SI voltado para HV no Brasil e no mundo, identificando oportunidades e desafios para implementação deste modelo.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA CRÍTICA

Economia circular

A reutilização de resíduos e sua otimização máxima representam um elemento central no comprometimento das indústrias com um ambiente mais sustentável. Um fluxo destinado a gerar valor a partir de resíduos deve enfatizar sua elaboração em ideias que utilizem o resíduo em outras atividades, contribuindo para a redução de emissões de poluentes e do descarte de produtos e materiais no meio ambiente, com essas características moldando o conceito de economia circular (EC) (Korhonen et al., 2018).

A EC é definida como uma abordagem inovadora para a gestão de recursos, com o propósito de minimizar o desperdício, reduzir o consumo de matérias-primas e fomentar a reutilização e a reciclagem de produtos e materiais. Esse conceito é reconhecido por sua desejável eficácia na mitigação dos impactos ambientais negativos e na promoção de oportunidades econômicas de natureza sustentável (Ghisellini et al., 2016).

Dentro dessas oportunidades econômicas, a simbiose industrial (SI) é uma alternativa inserida nesse conceito no aspecto econômico sustentável. A SI tem como objetivo fundamental a criação de sistemas mais eficazes, economicamente viáveis e ecologicamente responsáveis, contribuindo para a construção de um futuro caracterizado pela sustentabilidade (Tseng et al., 2018).

Simbiose industrial

A simbiose industrial (SI) pode ser entendida como a prática de compartilhar recursos, como resíduos, materiais, água, logística, equipamentos e

subprodutos, entre empresas ou setores diferentes. Isso leva a uma utilização mais eficiente de recursos para fins produtivos, resultando em benefícios mútuos e maior sustentabilidade. O principal objetivo da SI é aumentar a produção e economizar recursos e energia por meio da colaboração entre empresas (Akyazi et al., 2023).

As empresas buscam um retorno coletivo maior do que a soma das vantagens individuais que poderiam alcançar atuando individualmente. Os elementos-chave para a SI são a colaboração e as possibilidades sinérgicas proporcionadas pela proximidade geográfica entre as organizações interessadas (Neves et al., 2020). Os benefícios conseguidos pela SI podem ser destacados como redução de matéria-prima e seus respectivos custos, eficiência no uso de recursos, redução de poluição e de gases responsáveis pelo efeito estufa, redução no custo de gerenciamento de resíduos, relacionamentos com empresas externas, desenvolvimento de novos produtos, aumento de competitividade, criação de poder de compra e estratégia conjunta, além de uma maior eficiência energética (Mortensen; Korhonen, 2019).

Os benefícios de participar de uma SI não estão limitados a segmentos específicos dentro do cenário industrial. Setores como o manufatureiro, agroindustrial e químico podem se beneficiar da SI para promover práticas sustentáveis, melhorar a competitividade e atender a regulamentações ambientais cada vez mais rigorosas (Boix et al., 2015).

Savian et al. (2023) abordam a utilização da SI para a produção de hidrogênio verde (HV) com o uso de fontes renováveis de energia, demonstrando um modelo que pode ser replicado no Brasil.

Geração de hidrogênio

O hidrogênio representa 90% da massa de toda matéria, sendo o elemento mais abundante da Terra. Esse elemento é caracterizado como um gás incolor, inodoro, insípido e altamente inflamável nas condições normais de pressão e temperatura (CNTPT). Na Terra, o hidrogênio é encontrado principalmente na forma molecular, presente em substâncias como hidrocarbonetos e água, entre outras. Notavelmente, o hidrogênio possui a maior densidade energética por unidade de massa, com um valor de 120,7 KJ g⁻¹, quando comparado a outros combustíveis (Xianxian et al., 2022).

Conforme a Agência Internacional de Energia (International Energy Agency, 2023), em 2022, a produção mundial de hidrogênio alcançou aproximadamente 95 milhões de toneladas (Mt); esse resultado equivale a um aumento de 3% em relação

a 2021. Observa-se que a produção de hidrogênio ainda possui uma dependência do petróleo, seja como matéria-prima ou fonte de energia. O gás natural, sem a implementação de tecnologias de captura, uso e armazenamento de carbono (CCUS, Carbon Capture Use and Storage), contribuiu com 62% da produção global de hidrogênio. O carvão mineral, principalmente concentrado na China, representou 21% da produção total de hidrogênio em escala global. Por volta de 16% da produção global de hidrogênio provém de subproduto de processos de reforma da nafta realizados em refinarias e na indústria petroquímica.

Diante da dependência atual em relação às fontes primárias de energia, que são predominantemente derivadas de combustíveis fósseis, o hidrogênio tem despertado considerável interesse da comunidade científica e tecnológica mundial. O hidrogênio apresenta o potencial de desempenhar um papel crucial na transição energética, visando alcançar um futuro com emissões zero de gases poluentes. Esse potencial é sustentado pela sua ampla aplicação na indústria, bem como pela sua capacidade de servir como meio eficaz para o armazenamento de energia (Muradov, 2017).

Categorias de hidrogênio

De acordo com Incer-Valverde et al. (2023), as cores atribuídas ao hidrogênio estão associadas aos processos de produção de hidrogênio e são definidas com base no tipo de processo, fontes de energia utilizada e emissão de CO_2 na atmosfera. Desse modo, podem-se destacar:

- a) Hidrogênio cinza.
- b) Hidrogênio marrom.
- c) Hidrogênio azul.
- d) Hidrogênio turquesa.
- e) Hidrogênio verde.

O hidrogênio cinza é obtido a partir de fontes de energia fósseis, como a reforma a vapor do gás natural ou a gaseificação do carvão mineral sem captura. A designação cinza está relacionada à pegada de carbono associada a essas fontes de energia, indicando que a produção de hidrogênio é caracterizada por emissões significativas de carbono como CO_2 , tornando-a prejudicial para o meio ambiente (Ajanovic; Sayer; Haas, 2022). Por sua vez, o hidrogênio marrom é produzido a partir de carvão mineral, utilizando processo de gaseificação, resultando em emissões consideráveis de carbono, novamente como CO_2 . A cor marrom é emblemática de uma

produção de hidrogênio altamente poluente e não sustentável (Arcos; Santos, 2023).

O hidrogênio azul é gerado a partir das mesmas fontes de energia fósseis utilizadas no hidrogênio cinza. No entanto, incorpora tecnologias CCUS para reduzir, de forma, significativa as emissões de carbono, como CO_2 , associadas à sua produção. A cor azul simboliza a transição para um processo de produção de hidrogênio mais limpo e com baixas emissões de carbono (CO_2) (Ratnakar et al., 2021). Diferentemente dos processos de produção convencionais anteriormente mencionados, a síntese do hidrogênio turquesa por meio da pirólise do metano resulta em um subproduto de carbono sólido, sob a forma de carbono filamentosos ou nanotubos de carbono. Esse material pode ser empregado em processos subsequentes de produção ou apresentar vantagens quanto à facilidade de armazenamento, resultando, assim, em uma redução da pegada de carbono (Koranyi et al., 2022).

A categoria do hidrogênio verde (HV) é a que mais vem ganhando destaque por causa da possibilidade de se obter zero emissão de GEE na atmosfera, em comparação com as outras categorias de hidrogênio, anteriormente vistas, sendo um processo totalmente sustentável com perspectivas positivas para engajamento acadêmico, industrial, social e político. A cor verde é para caracterizar seu processo de obtenção, que deve ser ambientalmente sustentável e não resultar em emissões de carbono (como CO_2), dado que a energia utilizada é limpa ou renovável. Essas categorizações de cores constituem uma maneira eficaz de classificar o hidrogênio com base nos métodos de produção, dando ênfase sobre a criação de novos processos mais limpos e sustentáveis, como o hidrogênio verde, na busca por uma economia de hidrogênio mais ambientalmente responsável (Sorrenti et al., 2023).

Hidrogênio verde

O hidrogênio verde (HV) é uma forma de hidrogênio produzida, na maioria dos casos, por meio de um processo de eletrólise da água que utiliza eletricidade gerada a partir de fontes renováveis, como energia solar ou eólica. Esse processo de produção torna o HV uma fonte de energia limpa e sustentável, com várias aplicações em setores que buscam reduzir suas emissões de carbono e depender menos de combustíveis fósseis. Um dos principais aspectos positivos relacionados ao HV é sua utilidade, que pode contribuir para diversos segmentos, resultando em uma demanda global por um produto eficiente e altamente sustentável (Nikolaids; Poullikkas, 2017).

Assim, o HV desempenha um papel importante na transição para uma economia mais sustentável, por causa da possibilidade de aplicação em diversos setores, incluindo transporte, armazenamento de energia, produção de produtos químicos, geração de energia, indústria e geração de calor e vapor (Amin et al., 2022). A Figura 1 ilustra um resumo do ciclo do HV até suas principais características de aplicações.

Atualmente, a maior parte da produção de hidrogênio em todo o mundo é baseada em processos que extraem o gás de recursos fósseis usando gaseificação, reforma a vapor e processos de pirólise. Contudo, estas tecnologias convencionais de produção de hidrogênio não são adequadamente sustentáveis, uma vez que dependem fortemente de combustíveis fósseis que causam emissões de carbono. Serão necessários processos que fazem uso de fontes renováveis de energia para produzir hidrogênio sem emitir gás carbônico, considerando-se

as potenciais alterações climáticas por causa das emissões de GEE (Goren et al., 2023).

Produção de hidrogênio verde a partir da energia eólica

No processo de produção de hidrogênio a partir da energia eólica, as turbinas capturam a energia cinética do vento e a transformam em eletricidade por meio de um gerador. A eletricidade gerada pelas turbinas eólicas é convertida para uma forma adequada para a transmissão e distribuição. Isso normalmente envolve a conversão de corrente alternada (CA) para corrente contínua (CC). Nesse processo, a energia é direcionada para um eletrolisador, que com água desmineralizada separa os átomos de hidrogênio e oxigênio da molécula de água por meio de uma reação química (eletrolise), gerando oxigênio e hidrogênio de alta pureza (Calado; Castro, 2021).

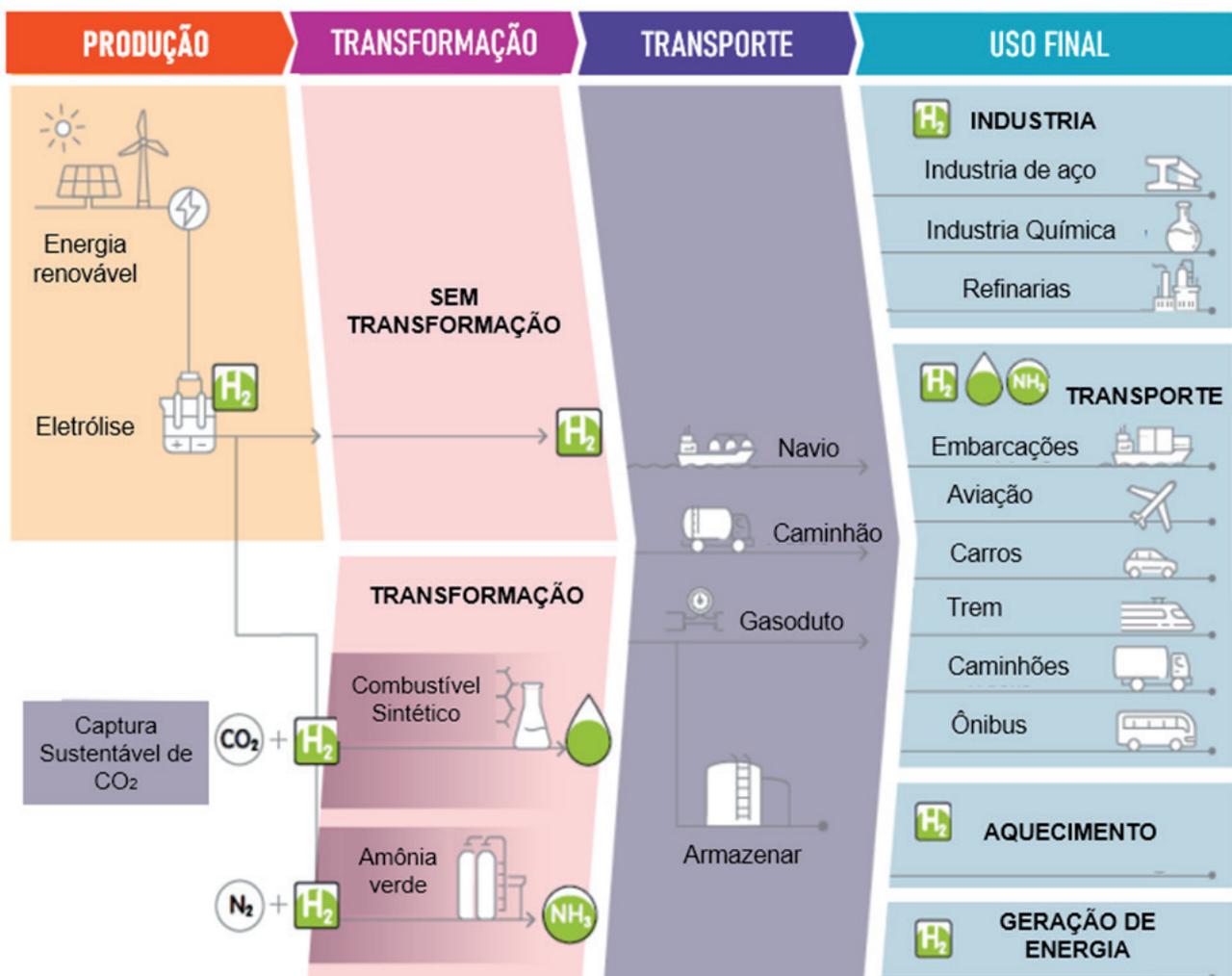


Figura 1. Cadeia do hidrogênio verde (HV).

Fonte: adaptado de IRENA (International Renewable Energy Agency, 2020).

Produção de hidrogênio verde a partir da energia solar

Painéis solares fotovoltaicos, compostos por células fotovoltaicas, captam a luz solar incidente. Quando a luz solar atinge as células fotovoltaicas, os fótons da luz excitam elétrons nos átomos do material semicondutor das células, criando uma corrente elétrica contínua que, posteriormente, é convertida em corrente alternada por um inversor (Kabir et al., 2018). Esse processo de produção envolve a utilização de eletricidade gerada a partir de painéis solares fotovoltaicos para realizar a eletrólise da água, dividindo-a em hidrogênio e oxigênio. O HV produzido por energia solar/fotovoltaica pode ter custos iniciais elevados por causa da infraestrutura necessária para a geração solar (Frowijn; Sark, 2021).

Produção de hidrogênio verde a partir do biogás

O biogás é um produto resultante da digestão anaeróbia de matéria orgânica (MO). A digestão anaeróbica é um processo biológico no qual microrganismos são condicionados em ambientes sem oxigênio e decompõem a MO. O efeito desse processo produz o biogás, composto principalmente por metano (CH_4) em uma proporção média de 60% e dióxido de carbono (CO_2) em uma proporção de 40% (Karne et al., 2023). Obter o hidrogênio verde por meio do biogás consiste em realizar o processo de reforma a vapor, em que o metano é separado do dióxido de carbono, e, ao final do processo, é extraído o HV (Pajak et al., 2023). Este tipo de HV é

especialmente interessante para o Brasil, em razão da grande disponibilidade de resíduos agroindustriais (Vaz Jr., 2020).

Atualmente, a produção de hidrogênio não está limitada ao uso de uma única fonte de energia, e como alternativas de obtenção do HV a partir de fontes renováveis diferentes, tem-se a energia eólica, hidráulica e solar. Contudo, oferecer alternativas para gerar este cenário de possibilidades dependem da capacidade geográfica e logística disponível. A matriz energética brasileira (Figura 2) atende essas características por possuir uma grande diversidade no fornecimento de energia, que é, em grande parte, proveniente de fontes renováveis (Gehrke et al., 2021).

O Brasil, com uma matriz energética de reduzidos impactos ambientais negativos, tem potencial para produção de HV. Em abril de 2021, uma resolução foi estabelecida para propor diretrizes ao Programa Nacional de Hidrogênio (PNH2) (Brasil, 2021). Espera-se que surjam novas alternativas ao longo do tempo, permitindo o desenvolvimento de tecnologias e conceitos para explorar de forma mais eficiente as vantagens da matriz energética brasileira (Lequer et al., 2023).

Nesse sentido, Pang et al. (2021) apresentaram o conceito da utilização da ecologia industrial (EI) por meio da simbiose industrial (SI) aplicada à produção de hidrogênio, em que se propõe um sistema multienergético de base renovável (RMES) para combinar quatro sistemas separados: refrigeração, aquecimento, hidrogênio e energia.

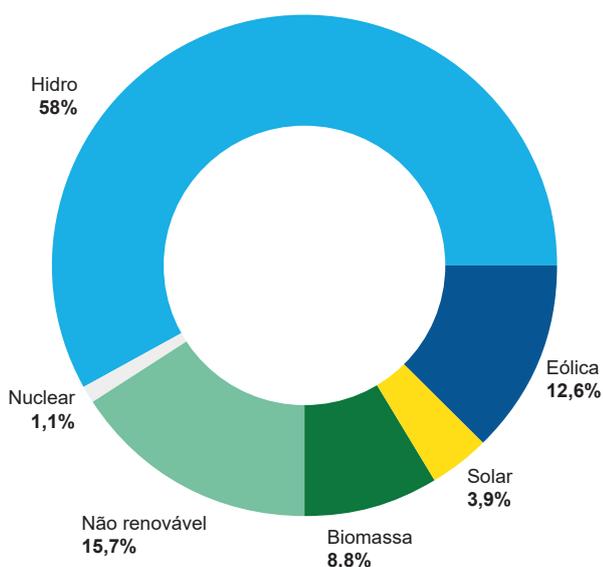


Figura 2. Percentual das fontes de energia renovável (hidráulica, eólica, solar e biomassa) na matriz energética brasileira.

Fonte: Balanço Energético Nacional (Epe, 2023).

Simbiose industrial e hidrogênio verde

O sistema de produção de hidrogênio é composto por etapas essenciais, incluindo o fornecimento de energia renovável, o abastecimento de água ou efluente, a hidrólise da água e, por fim, o armazenamento e a distribuição. Esses estágios são fundamentais para o fluxo completo de obtenção de hidrogênio verde (Azadnia et al., 2023). Como todo processo de produção, o fluxo de obtenção pode sofrer alterações visando atingir melhorias no processo tanto no sentido econômico quanto na eficácia

(Lepage et al., 2021). É nesse sentido que a aplicação da simbiose industrial (SI) é introduzida na produção de hidrogênio, objetivando tornar o processo mais rentável, eficaz e sustentável. A junção desses conceitos pode possibilitar a formação de uma rede produtiva que possa viabilizar oportunidades de aplicações variadas, conduzindo a modelos de SI até mesmo para aplicação em outros segmentos que não estejam diretamente envolvidos com a produção do gás (Farouk; Chew, 2021). A Tabela 1 apresenta exemplos de pesquisas desenvolvidas que fazem o uso da SI na geração de HV.

Tabela 1. Pesquisas que contribuem para o uso da simbiose industrial para a produção de hidrogênio verde.

Título	Citação	Principais observações
Prospects and challenges of green hydrogen economy via multi-Sector global symbiosis in Qatar	Eljack e Kazi (2021).	Neste estudo, foram avaliados os desafios de uma abordagem de simbiose multissetorial industrial-urbana voltada para a implementação da cadeia de abastecimento de hidrogênio. Essa simbiose visa otimizar a interação entre diversas indústrias e o planejamento urbano, explorando diversas aplicações multifuncionais do hidrogênio que, com o planejamento adequado, pode ser implementado de forma eficaz.
The potential of hydrogen technologies for low-carbon mobility in the urban-industrial symbiosis approach	Butturi e Gamberini (2022)	Este estudo teve como objetivo realizar uma investigação das possibilidades decorrentes da criação de sinergias entre aglomerados industriais e áreas urbanas adjacentes, visando aprimorar a sustentabilidade local e facilitar a implementação de soluções de mobilidade de baixo carbono por meio do uso de hidrogênio verde. O trabalho identificou que sinergias industriais apresentam grande potencial para serem um ponto de partida para a geração desse tipo de hidrogênio.
Low-carbon and cost-efficient hydrogen optimisation through a grid-connected electrolyser: The case of GreenLab skive	Sorrenti et al. (2023)	Este artigo realizou uma análise do impacto das diferentes fontes de energia no custo de produção e na pegada de carbono associada à produção de hidrogênio utilizando o GreenLab Skive, a primeira instalação industrial do mundo a integrar geração de energia renovável em uma rede de simbiose industrial, como estudo de caso. Os resultados demonstraram que a utilização de um eletrolisador alimentado por energia eólica, fotovoltaica e da rede elétrica para a produção de hidrogênio e eletricidade resulta na redução dos custos operacionais e das emissões de carbono, economizando $30,6 \times 10^7$ kg de CO_2 e apresentando um valor presente líquido duas vezes superior em comparação a um eletrolisador ligado apenas à rede elétrica.
Optimal planning of inter-plant hydrogen integration (IPHI) in eco-industrial park with P-graph and game theory analyses	Affery et al. (2021)	Este estudo de caso foi conduzido para analisar a viabilidade do uso de hidrogênio verde, gerado a partir de energia solar, juntamente com efluentes de fábricas de óleo de palma e águas residuais. Nele, foram aplicados quatro esquemas de integração, utilizando uma abordagem fundamentada na teoria dos jogos para a tomada de decisões. A metodologia proposta demonstrou que a maximização do bem-estar coletivo pode ser alcançada por meio da cooperação entre todas as redes envolvidas, visando a otimização de Pareto. Isso está alinhado com o compromisso de enfrentar as mudanças climáticas e alcançar os objetivos de sustentabilidade estabelecidos na agenda global da ONU.

Material e métodos

Segundo Ellegaard (2018), a pesquisa bibliométrica – ou o levantamento bibliométrico – caracteriza-se como uma ferramenta analítica amplamente empregada em diversos contextos, abrangendo uma vasta gama de aplicações. Essa abrangência engloba desde as tradicionais medições de impacto de citações até a detecção de substâncias problemáticas no ambiente, com o propósito de avaliar tendências, impacto e relevância de investigações em uma área específica.

Este levantamento bibliométrico define-se por uma busca em bases de dados internacionais direcionadas à aplicação do conceito da SI para a produção de HV. A estratégia de busca utilizada foi moldada em combinações de palavras-chave visando obter resultados mais centralizados que abordassem os conteúdos-alvo (SI associada à produção de HV). Assim, utilizou-se o critério booleano AND em todas as relações de palavras. Além disso, foram consideradas as pesquisas compreendidas entre os anos de 2021 e 2023. As combinações das palavras-chave elaboradas para busca nas bases de dados foram:

- Green Hydrogen, Energy Transition (combinação 1).
- Industrial Symbiosis, Low Carbon (combinação 2).
- Renewable Energy, Green Hydrogen, CO₂ (combinação 3).
- Climate Change, Green Hydrogen (combinação 4).
- Industrial Simbioses, Green Hydrogen (combinação 5).

Cabe salientar que as palavras-chave foram definidas a partir de termos relevantes observados na literatura científica e na literatura patentária envolvidas com o escopo da busca.

As bases de dados consideradas, inicialmente, para realizar a busca foram Web of Science⁽³⁾ e Scopus⁽⁴⁾.

Após a realização da busca, foram gerados gráficos utilizando o recurso das próprias bases de dados, considerando as quantidades de publicações por país. Posteriormente, foi aplicada a matriz SWOT direcionada para o cenário brasileiro para uma análise com base na leitura dos artigos que englobaram a temática de busca. Em Gurel e Tat (2017), a matriz SWOT é conceituada como uma ferramenta de gestão utilizada para avaliar a situação atual de empresa, projeto, produto ou até mesmo de uma pessoa, e ajudar a planejar estratégias futuras de ação. Ademais, é uma ferramenta de interpretação e análise prática de temas de PD&I.

⁽³⁾ <https://www.webofscience.com/wos/woscc/basic-search>

⁽⁴⁾ <https://www.scopus.com/search/form.uri?display=basic#basic>

Resultados e discussão

A base de dados Scopus mostrou-se mais completa em relação ao conteúdo (ou resultados) das buscas realizadas. As buscas foram moldadas com o objetivo de identificar a maior incidência de resultados por país, englobando a SI voltada para produção de HV. A Figura 3 mostra os resultados da pesquisa, conforme a combinação 1.

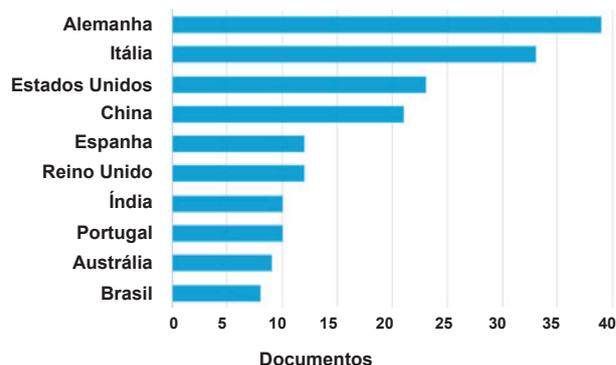


Figura 3. Os 10 países que apresentaram o maior número de publicações, conforme a combinação 1 Green Hydrogen, Energy Transition.

A Figura 4 mostra os resultados da pesquisa conforme a combinação 2 das palavras-chave definidas na metodologia descrita.

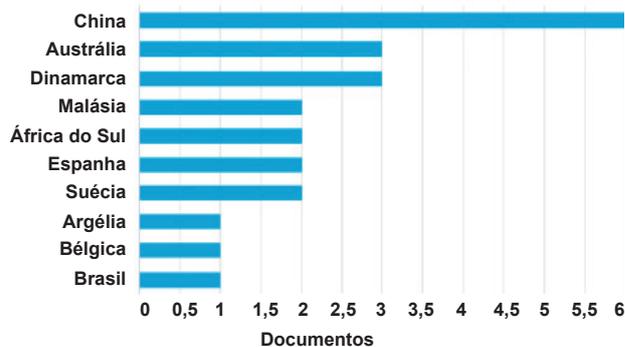


Figura 4. Os 10 países que apresentaram o maior número de publicações, conforme a combinação 2 Low Carbon, Industrial Symbiosis.

A Figura 5 mostra os resultados da pesquisa conforme a combinação 3 das palavras-chave definidas na metodologia.

A Figura 6 mostra os resultados da pesquisa conforme a combinação 4 das palavras-chave definidas na metodologia.

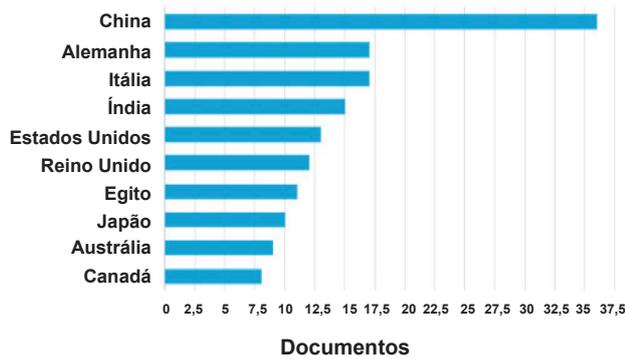


Figura 5. Os 10 países que apresentaram o maior número de publicações, conforme a combinação 3 Renewable Energy, Green Hydrogen, CO₂.

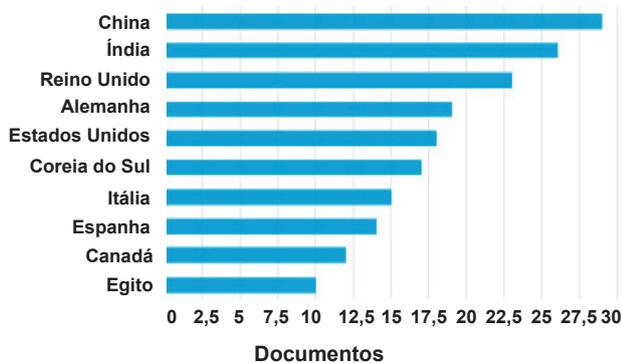


Figura 6. Os 10 países que apresentaram o maior número de publicações, conforme a combinação 4 Climate Change, Green Hydrogen.

A Figura 7 mostra os resultados da pesquisa conforme a combinação 5 das palavras-chave definidas na metodologia.

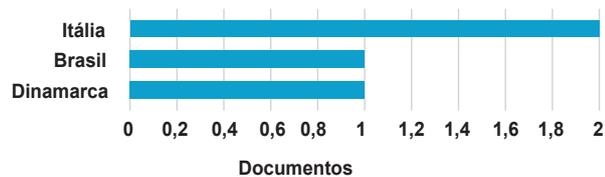


Figura 7. Os 10 países que apresentaram o maior número de publicações, conforme a combinação 5 Industrial Symbiosis, Green Hydrogen.

A condução da pesquisa e a geração dos gráficos foram realizadas usando exclusivamente a base de dados Scopus. Os resultados indicaram que a China possui uma posição de destaque na maioria das combinações que envolvem o uso da SI e de HV, como pode ser visto nas combinações 2, 3 e 4.

Isso se deve à alocação de recursos significativos em tecnologias limpas, aos incentivos governamentais favoráveis e à demanda crescente por soluções sustentáveis de energia. Esses fatores criam um ambiente propício para a realização de novas pesquisas, impulsionando o país asiático no cenário de PD&I. No entanto, na combinação 1, que correlaciona a transição energética e HV, a Alemanha lidera no número de publicações, seguida por Itália, Estados Unidos da América e China.

A combinação 5, que envolve os termos de SI e HV, possui o menor número de publicações, conforme mostrado na Figura 7. Apenas três países, Itália, Brasil e Dinamarca, estão ativos nesse campo. A diferença da combinação 5 em relação às outras é sua abrangência mais limitada. As demais combinações incluem termos com conceitos mais amplos, o que pode resultar em um maior número de resultados de pesquisa. Portanto, o baixo número de pesquisas encontradas na combinação sugere que o desenvolvimento científico e tecnológico relacionado a ambos os conceitos está emergindo. Por essa razão, até mesmo países mais desenvolvidos, como China e Estados Unidos, não são encontrados nos resultados ao utilizar os termos de SI e HV, especificamente.

De um modo geral, a China tem o protagonismo no cenário de PD&I relacionado tanto ao HV quanto a SI. Contudo, ainda são escassos os resultados quando esses termos são relacionados, indicando oportunidades de PD&I, por ser um campo ainda pouco explorado. A respeito do Brasil, o País apresentou pouco protagonismo em PD&I a partir dos resultados obtidos das buscas. Apesar disso, Oliveira (2022) evidenciou o potencial do País, pela grande diversidade de sua matriz energética, o que possibilita a criação de rotas de produção de HV que podem ter diferentes configurações quanto ao uso de fontes de energia, além de destacar as localizações geográficas favoráveis para desenvolvimento de novas alternativas de produção. Em oposição aos resultados das buscas realizadas, há de se considerar que o Brasil apresenta forte potencial para projetos que envolvam a SI para produção e utilização de HV, especialmente em parques industriais e agroindustriais.

Com a interpretação das referências bibliográficas e dos resultados do levantamento bibliométrico, aplicou-se a análise SWOT para a combinação SI e HV para um ambiente brasileiro. A Figura 8 apresenta essa matriz SWOT contendo forças, fraquezas, oportunidades e ameaças levantadas.

FORÇAS (STRENGTHES)	FRAQUEZAS (WEAKNESSES)
<ul style="list-style-type: none"> • Eficiência energética na produção de hidrogênio verde por meio de simbiose industrial. • Redução das emissões de gases de efeito estufa na atmosfera, principalmente o dióxido de carbono. • Redução na geração de resíduos. • Otimização da utilização de recursos por meio de parcerias estratégicas com outras indústrias. 	<ul style="list-style-type: none"> • Alto investimento em infraestrutura e tecnologia para atendimento de requisitos legais e eficiência do processo. • Dependência da localização de indústrias e coordenação logística. • Risco de interrupções na cadeia de suprimentos em razão da dependência de outros setores.
OPORTUNIDADES (OPPORTUNITIES)	AMEAÇAS (THREATS)
<ul style="list-style-type: none"> • Aumento da demanda global por hidrogênio verde como fonte de energia limpa. • Incentivos governamentais e políticas de sustentabilidade que apoiam a produção de hidrogênio verde. • Possibilidades de expansão e diversificação das parcerias de simbiose industrial. • Oportunidades para o desenvolvimento de tecnologias para melhorar a eficiência e reduzir custos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Variações nos preços de matérias-primas e energia. • Mudanças nas regulamentações ambientais e de segurança que podem afetar a produção de hidrogênio verde. • Riscos associados à segurança cibernética e à privacidade dos dados nas operações de simbiose industrial.

Figura 8. Matriz SWOT do uso da simbiose industrial na produção de hidrogênio verde no Brasil.

Conclusões

O levantamento bibliométrico possibilita verificar e avaliar um cenário de PD&I de uma determinada área do conhecimento, por meio de métricas e análises quantitativas de pesquisas publicadas, objetivando a identificação de tendências e tópicos de pesquisa, avaliação da produtividade científica e verificação de fontes de informações relevantes. Neste caso, o levantamento bibliométrico concentrou-se na busca pelo uso da simbiose industrial (SI) para produção de hidrogênio verde (HV).

Os resultados do levantamento bibliométrico apresentaram uma carência de pesquisas que envolvam o conceito de SI aplicada à produção de HV. Apesar disso, individualmente, o número de resultados observados para cada um desses conceitos é relativamente alto, conforme as combinações realizadas.

A partir do levantamento bibliométrico, também foi possível identificar a localidade em que as pesquisas apresentam uma maior concentração de resultados, moldados pelos objetivos das buscas realizadas. Assim, a China destacou-se quanto às combinações elaboradas, seguida de Alemanha, Itália e Estados Unidos da América. O Brasil apresentou um baixo protagonismo em comparação aos demais países. No entanto, o País apresenta ambiente favorável para PD&I envolvendo a SI para produção de HV, por causa, principalmente, da sua

grande diversidade de fontes de energia, com uma matriz energética de forte base renovável. Essa característica pode impulsionar a adoção do conceito de SI, oferecendo diversas alternativas para a construção de uma simbiose a partir das estruturas já existentes. O Nordeste do Brasil, conhecido por suas turbinas eólicas e painéis solares, já possui algumas iniciativas nesse sentido, como hubs tecnológicos. Um hub de hidrogênio é uma infraestrutura centralizada que integra produção, armazenamento, distribuição e utilização do hidrogênio, facilitando o fornecimento desse combustível para vários setores, como transporte, indústria e residências. Por fim, a matriz SWOT possibilitou uma maior visualização das oportunidades e dos desafios para o cenário brasileiro, podendo auxiliar na proposição de novos estudos com a associação entre SI, produção e uso de HV.

Referências

AFFERY, A. P.; TAN, J. X.; ONG, I. Y. B.; LIM, J. Y.; YOO, C.; HOW, B. S.; LING, G. G. T.; FOO, D. C. Y. Optimal planning of inter-plant hydrogen integration (IPHI) in eco-industrial park with P-graph and game theory analyses. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 155, p. 197-218, November 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2021.08.016>. Acesso em: 23 ago. 2024.

- AJANOVIC, A.; SAYER, M.; HAAS, R. The economics and the environmental benignity of different colors of hydrogen. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 47, n. 57, p. 24136-24154, 5 July 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.02.094>.
- 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, n. 54, p. 1-22, 2023. DOI: <https://enveurope.springeropen.com/articles/10.1186/s12302-023-00762-z>.
- AMIN, M.; SHAH, H. H.; FAREED, A. G.; KHAN, W. U.; CHUNG, E.; ZIA, A.; FAROOQI, Z. U. R.; LEE, C. Hydrogen production through renewable and non-renewable energy processes and their impact on climate change. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 47, n. 77, p. 33112-33134, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.07.172>.
- ARCOS, J. M. M.; SANTOS, D. M. F. The hydrogen color spectrum: techno-economic analysis of the available technologies for hydrogen production. **Gases**, v. 3, n. 1, p. 25-46, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/gases3010002>.
- AZADNIA, A. H.; MCDAID, C.; ANDWARI, A. M.; HOSSEIN, S. E. Green hydrogen supply chain risk analysis: A european hard-to-abate sectors perspective. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 182, article number, 113371, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113371>.
- BOIX, M.; MONTASTRUC, L.; AZZARO-PANTEL, C.; DOMENECH, S. Optimization methods applied to the design of eco-industrial parks: a literature review. **Journal of Cleaner Production**, v. 87, p. 303-317, 15 January 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.09.032>.
- BRASIL. Conselho Nacional de Política Energética. Resolução nº 6, de 20 de abril de 2021. Determina a realização de estudo para proposição de diretrizes para o Programa Nacional do Hidrogênio. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 17 de maio de 2021, edição 91, Seção 1, p. 10. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/despacho-do-presidente-da-republica-320051164>. Acesso em: 25 out. 2023.
- BUTTURI, M. A.; GAMBERINI, R. The potential of hydrogen technologies for low-carbon mobility in the urban-industrial symbiosis approach. **International Journal of Energy Production and Management**, v. 7, n. 2, p. 151-163, 2022. DOI: <https://dx.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, n. 12, Article number, 5561, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/app11125561>.
- DAQUIN, C.; ALLAOUI, H.; GONCALVES, G.; HSU, T. Centralized collaborative planning of an industrial symbiosis: mixed-integer linear model. **Computers & Industrial Engineering**, v. 180, article number 109171, June 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2023.109171>.
- DOU, Y.; SUN, L.; FUJJI, 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: technologies, modelling, applications, sustainability and policies**. Cambridge, MA : Academic Press Elsevier, 2020. p. 311-332. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820539-6.00010-8>.
- DRELA, K. Harnessing solar energy and green hydrogen - the energy transition. **Procedia Computer Science**, v. 192, p. 4942-4951, 2021. Special number of Knowledge-Based and Intelligent Information & Engineering Systems: Proceedings of the 25th International Conference KES2021, Szczecin, Poland. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.09.272>.
- ELJACK, F.; KAZI, M. K. Prospects and challenges of green hydrogen economy via multi-sector global symbiosis in Qatar. **Frontiers in Sustainability**, v. 1, 612762, 21 January 2021. 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>.
- EPE. **Balço energético nacional 2023: ano base 2022**. Rio de Janeiro, 2023. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-748/topico-687/BEN2023.pdf>. Acesso em: 23 ago. 2024.
- FAROUK, A. A.; CHEW, I. M. L. Development of a simultaneous mass-water carbon-hydrogen-oxygen symbiosis network. **Sustainable Production and Consumption**, v. 28, p. 419-435, October 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.06.004>.
- FROWIJN, L. S. F.; SARK, W. G. J. H. M. van. Analysis of photon-driven solar-to-hydrogen production methods in the Netherlands. **Sustain Energy Technol Assessments**, v. 48, 101631, December 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101631>.

- GEHRKE, P.; GORETTI, A. A. T.; AVILA, L. V. Impacts of the energy matrix on Brazilian sustainable development. **Rev. Adm. UFSM**, v. 14, Special Issue 9^o Forum Internacional Ecoinovar, 2021. DOI: <https://doi.org/10.5902/1983465964409>.
- GHISELLINI, 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, n. 1, p. 11-32, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.007>.
- GOREN, A. Y.; DINCER, I.; KHALVATI, A. A comprehensive review on environmental and economic impacts of hydrogen production from traditional and cleaner resources. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 11, n. 6, Article number 111187, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.111187>.
- GUREL, E.; TAT, M. Swot analysis: a theoretical review. **The Journal of International Social Research**. v. 10, n. 51, p. 994 -1006, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.17719/jisr.2017.1832>.
- 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>.
- INCER-VALVERDE, J.; KORAYEM, A.; TSATSARONIS, G.; MOROSUK, T. "Colors" of hydrogen: definitions and carbon intensity. **Energy Conversion and Management**, v. 291, Article number 117294, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.117294>.
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Global hydrogen review 2023**. 2023. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2023>. Acesso em: 14 out. 2023.
- INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY. **Global renewables outlook: energy transformation 2050**. Abu Dhabi, 2020. Disponível em: <https://www.irena.org/publications/2020/Apr/Global-Renewables-Outlook-2020>. Acesso em: 23 ago. 2024.
- ISHAQ, H.; DINCER, I.; CRAWFORD, C. A review on hydrogen production and utilization: challenges and opportunities. **International Journal of Hydrogen Energy**. v. 47, n. 62, p. 26238-26264, 22 July 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.11.149>.
- KABIR, E.; KUMAR, P.; KUMAR, S.; ADELODUN, A. A.; KIM, K. H. Solar energy: potential and future prospects. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 82, n. 1, p. 894-900, February 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.094>.
- KARNE, H.; MAHAJAN, U.; KETKAR, U.; KOHADE, A.; KHADILKAR, P.; MISHRA, A. A review on biogas upgradation systems. **Materialstoday: Proceedings**, v. 72, p. 775-786, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.09.015>.
- KORÁNYI, T. I.; NÉMETH, M.; BECKE, A.; HORVÁTH, A. Recent advances in methane pyrolysis: turquoise hydrogen with solid carbon production. **Energies**, v. 15, article number 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, n.1, p. 37-46, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2017.06.041>.
- LEPAGE, T.; KAMMOUN, M.; SCHMETZ, Q.; RICHEL, A. Biomass-to-hydrogen: a review of main routes production, processes evaluation and techno-economical assessment. **Biomass and Bioenergy**, v. 144, Article number, 105920, Jan 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105920>.
- LEQUER, P. H. N.; BORJAS, G. P.; SIMOES, A. F.; DOMINGUES, M. S. The expansion of renewable energy in Brazil: opportunities and barriers within the context of energy transition and climate change mitigation. **Cuadernos de Educación y Desarrollo**, v. 15, n. 3, p. 2535-2563, 2023. DOI: <https://doi.org/10.55905/cuadv15n3-028>.
- MARINELLI, S.; BUTTURI, M. A.; RIMINI, B.; GAMBERINI, R.; MARINELLO, S. Evaluating the environmental benefit of energy symbiosis networks in ecoindustrial. **IFAC Papers OnLine**, v. 53, n. 2, p. 13082-13087, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2020.12.2260>.
- MORTENSEN, L.; KORNOV, 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>.

- NEVES, A.; GODINA, R.; AZEVEDO, S. G.; MATIAS, J. C. O. A comprehensive review of industrial symbiosis. **Journal of Cleaner Production**, v. 247, article number, 119113, 20 Feb. 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, Jan. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.044>.
- OLIVEIRA, R. C. de. Panorama do Hidrogênio do Brasil. Brasília, DF: Instituto de pesquisa Econômica Aplicada, 2022. 59 p. (Texto para Discussão, 8787). Disponível em: https://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/11291/1/td_2787_web.pdf. Acesso em: 23 ago. 2024.
- PAJAK, M.; BRUS, G.; KIMIJIMA, S.; SZMYD, J. S. Enhancing hydrogen production from biogas through catalyst rearrangements. **Energies**, v. 16, n. 10, p. 4058, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16104058>.
- PANG, K. Y.; LIEW, P. Y.; HO, W. S.; WOON, K. S.; WAN ALWI, S. R.; KLEMES, J. J. Optimisation of renewable-based multi-energy system with hydrogen energy for urban-industrial symbiosis. **Chemical Engineering Transactions**, v. 88, 15 Nov. 2021. DOI: <https://doi.org/10.3303/CET2188033>.
- PANU, M.; TOPOLSKI, K.; ABRASH, S.; EL-HALWAGI, M. M. CO₂ footprint reduction via the optimal design of Carbon-Hydrogen-Oxygen SYmbiosis Networks (CHOSYNs). **Chemical Engineering Science**, v. 203, p. 1-11, 10 Aug. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ces.2019.03.066>.
- PEIN, M.; NEUMAN, N. C.; LUKE, J. V.; VIETEN, J.; ROEB, M.; SATTLER, C. Two-step thermochemical electrolysis: an approach for green hydrogen production. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 46, n. 49, p. 24909-24918, 16 July 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.05.036>.
- RATNAKAR, R. R.; GUPTA, N.; ZHANG, K.; DOORNE, C. van; 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, n. 47, p. 24149-24168, 9 July 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.05.025>.
- SAVIAN, F.; SELITO, M.; NERI, A.; SILVA, T.; OLIVEIRA, H. L. S.; BUTTURI, M. A. Green hydrogen, industrial symbiosis, and blockchain: enhancing sustainability and resilience in supply chains. **Communications of the ECMS**, v. 37, n. 1, 2023, p. 350 – 356, 2023. (Proceedings European Council for Modelling and Simulation, ECMS). Disponível em: https://www.scs-europe.net/dlib/2023/ecms2023acceptedpapers/0350_rssc_ecms2023_0061.pdf. Acesso em: 23 ago. 2024.
- SORRENTI, I.; ZHENG, Y.; SINGLITICO, A.; SHI, Y. Low-carbon and cost-efficient hydrogen optimisation through a grid-connected electrolyser: the case of GreenLab. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 171, article number 113033, January 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.113033>.
- TSENG, M. L.; TAN, R. R.; CHIU, A. S. F.; CHIEN, C. F.; KUO, T. C. Circular economy meets industry 4.0: can big data drive industrial symbiosis? **Resources, Conservation and Recycling**, v. 131, p.146-147, April 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.12.028>.
- VAZ JÚNIOR, S. **Aproveitamento de resíduos agroindustriais: uma abordagem sustentável**. Brasília, DF: Embrapa Agroenergia, 2020. 26 p. (Embrapa Agroenergia. Documentos, 31). Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1126255>. Acesso em: 23 ago. 2024.
- VICIANO, L. C.; CHOVER, V. H.; DOMINGO, A. B.; SANCHO, F. H. Industrial symbiosis: a mechanism to guarantee the implementation of circular economy practices. **Sustainability**, v. 14, n. 23, article number 15872, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/su142315872>.
- XIANXIAN, X.; QUAN, Z.; DEHAI, Y. The future of hydrogen energy: Bio-hydrogen production technology. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 47, n. 79, p.33677-33698, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.07.261>.



*Ministério da
Agricultura e Pecuária*