



ConBRepro

XIV CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

I CIGELUBRA

Congresso Internacional de Gestão e Engenharia Luso-Brasileiro

04 a 06 de dezembro de 2024

Energias Limpas nas Engenharias

Análise dos principais obstáculos econômicos e tecnológicos para a viabilização do hidrogênio verde como fonte exclusiva de energia limpa em Smart Cities, através da Bibliometria

Jaqueline Fonseca Rodrigues, Msc.

Engenharia de Produção – UTFPR

Fabio José Ceron Branco

Engenharia de Produção - UTFPR

Regina Negri Pagani, Dr^a

Engenharia de Produção - UTFPR

Resumo: Este estudo teve como objetivo geral analisar os principais obstáculos econômicos e tecnológicos para a viabilização do hidrogênio verde como fonte de energia em Cidades Inteligentes. Especificamente, buscou-se: identificar as tendências de pesquisa sobre o tema, os desafios na produção e armazenamento de hidrogênio e o papel das políticas públicas e incentivos econômicos para sua implementação. Utilizou-se a metodologia Methodi Ordinatio para realizar uma revisão sistemática da literatura, selecionando e classificando as publicações mais relevantes nas bases de dados Scopus, Web of Science e Science Direct. A análise de palavras-chave revelou tópicos como a importância da produção sustentável, os desafios de infraestrutura e armazenamento e a necessidade de políticas de apoio. Os resultados indicaram que, embora o hidrogênio verde tenha um grande potencial como solução de descarbonização, suas previsões dependem de avanços tecnológicos para reduzir custos e aumentar a eficiência, além de incentivos econômicos e regulamentações adequadas. Conclui-se que a implementação do hidrogênio verde em Cidades Inteligentes exige uma abordagem colaborativa entre governos e setores privados, além de uma infraestrutura robusta e políticas integradas. O estudo contribui ao fornecer um panorama atualizado das barreiras e oportunidades para o uso do hidrogênio verde em ambientes urbanos inteligentes, solicitado como base para futuros estudos práticos e desenvolvimento de políticas energéticas sustentáveis.

Palavras-chave: Hidrogênio verde, Cidades Inteligentes, Viabilidade econômica, Sustentabilidade energética, Inovação tecnológica.

Analysis of the main economic and technological obstacles to the viability of green hydrogen as an exclusive source of clean energy in Smart Cities, through Bibliometrics

Abstract: This study aimed to analyze the main economic and technological obstacles to the viability of green hydrogen as an energy source in Smart Cities. Specifically, it sought to: identify research trends on the topic, the challenges in hydrogen production and storage, and the role of public policies and economic incentives for its implementation. The Methodi Ordinatio methodology was used to carry out a systematic review of the literature, selecting and classifying the most relevant publications in the Scopus, Web of Science, and Science Direct databases. Keyword analysis revealed topics such as the importance of sustainable production, infrastructure and storage challenges, and the

need for supportive policies. The results indicated that, although green hydrogen has great potential as a decarbonization solution, its prospects depend on technological advances to reduce costs and increase efficiency, as well as economic incentives and adequate regulations. It is concluded that the implementation of green hydrogen in Smart Cities requires a collaborative approach between governments and the private sector, in addition to robust infrastructure and integrated policies. The study contributes by providing an updated overview of the barriers and opportunities for the use of green hydrogen in smart urban environments, which is requested as a basis for future practical studies and the development of sustainable energy policies.

Keywords: Green hydrogen, Smart Cities, Economic viability, Energy sustainability, Technological innovation.

1. Introdução

A crescente demanda global por fontes de energia limpa e a necessidade urgente de descarbonizar diversos setores, especialmente o industrial e de transportes, trazem à tona desafios para o desenvolvimento e implementação de tecnologias sustentáveis, como o hidrogênio verde (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2023). No contexto das energias renováveis, o hidrogênio verde, produzido por eletrólise da água utilizando eletricidade proveniente de fontes renováveis, tem sido apontado como uma alternativa promissória devido ao seu potencial para reduzir significativamente as emissões de carbono e à sua flexibilidade de uso em diferentes setores, incluindo transporte e indústria pesada (IRENA, 2022; ANDREI *et al.*, 2022).

As energias renováveis, como a solar, a eólica e o hidrogênio verde, representam alternativas estratégicas para o desenvolvimento de políticas públicas e projetos inovadores em engenharia, especialmente em áreas urbanas e industriais (ROGGE; JOHNSON, 2021). De acordo com Andrei *et al.* (2022), a transição para fontes renováveis, especialmente o hidrogênio verde, é fundamental para a criação de cidades inteligentes que busquem sustentabilidade e eficiência energética. No entanto, embora o hidrogênio verde seja promissor, sua implementação em larga escala enfrenta barreiras econômicas e tecnológicas significativas, incluindo custos elevados de produção, armazenamento e infraestrutura para distribuição (SABA *et al.*, 2018).

Estudos recentes destacam a necessidade de desenvolver inovações tecnológicas e políticas públicas para viabilizar o uso do hidrogênio verde como fonte viável e escalável de energia limpa. Segundo o relatório da Agência Internacional de Energia Renovável (2022), os investimentos em pesquisa e desenvolvimento, bem como a colaboração entre governos e setor privado, são essenciais para superar esses desafios. Este estudo realiza uma análise bibliométrica sobre a pesquisa em hidrogênio verde, identificando avanços e propondo uma agenda de pesquisa para preencher as lacunas existentes e contribuir para a transição energética das cidades inteligentes, alinhando-se à temática de energias limpas nas engenharias.

A crescente demanda global por fontes de energia limpa e a necessidade urgente de descarbonizar diversos setores, especialmente o industrial e de transportes, trazem à tona desafios para o desenvolvimento e implementação de tecnologias sustentáveis, como o hidrogênio verde (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2023). No contexto das energias renováveis, o hidrogênio verde, produzido por eletrólise da água utilizando eletricidade proveniente de fontes renováveis, tem sido apontado como uma alternativa promissória devido ao seu potencial para reduzir significativamente as emissões de carbono e à sua flexibilidade de uso em diferentes setores, incluindo transporte e indústria pesada (IRENA, 2022; ANDREI *et al.*, 2022).

As energias renováveis, como a solar, a eólica e o hidrogênio verde, representam alternativas estratégicas para o desenvolvimento de políticas públicas e projetos inovadores em engenharia, especialmente em áreas urbanas e industriais (ROGGE; JOHNSON, 2021).

De acordo com Andrei *et al.* (2022), a transição para fontes renováveis, especialmente o hidrogênio verde, é fundamental para a criação de cidades inteligentes que busquem sustentabilidade e eficiência energética. No entanto, embora o hidrogênio verde seja promissor, sua implementação em larga escala enfrenta barreiras econômicas e tecnológicas significativas, incluindo custos elevados de produção, armazenamento e infraestrutura para distribuição (SABA *et al.*, 2018).

Diante deste cenário, surge o problema central deste estudo: **Como superar os principais obstáculos econômicos e tecnológicos que impedem o hidrogênio verde de se tornar uma fonte viável e exclusivamente exigida de energia limpa no contexto das Smart Cities?**

Este problema central reflete a complexidade de transformar o hidrogênio verde em uma solução acessível e prática dentro das cidades inteligentes, que bloqueia tecnologias limpas e integradas para uma transição energética eficaz. Com uma análise bibliométrica, este estudo visa identificar os avanços realizados e os desafios ainda existentes, fornecendo diretrizes e orientações para pesquisas futuras na área de energias renováveis e tecnologias limpas, alinhadas às necessidades da engenharia moderna.

O referido artigo teve como objetivo geral: Analisar os principais obstáculos econômicos e tecnológicos para a viabilização do hidrogênio verde como fonte exclusiva de energia limpa em Smart Cities. Especificamente buscou-se: identificar os principais entraves econômicos que limitam a adoção da proteção verde em Smart Cities, com base em estudos bibliométricos, mapear os desafios tecnológicos enfrentados na implementação do hidrogênio verde como fonte de energia em ambientes urbanos inteligentes, e propor diretrizes para superar barreiras econômicas e tecnológicas, a partir das tendências e lacunas identificadas na literatura sobre hidrogênio verde e energias renováveis.

A presente pesquisa é relevante tanto intelectual quanto historicamente, pois aborda o potencial do hidrogênio verde como alternativa essencial para a transição energética sustentável nas Smart Cities. No cenário atual, caracterizado pela crescente demanda por energias limpas e pela busca de soluções urbanas inovadoras, o hidrogênio verde emerge como uma tecnologia promissora, mas ainda enfrenta obstáculos econômicos e tecnológicos significativos (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2023).

O tema foi escolhido devido à necessidade urgente de viabilizar fontes de energia renovável em ambientes urbanos, e a delimitação para o contexto das Cidades Inteligentes reflete a importância de criar soluções adaptáveis a espaços urbanos inteligentes. A pesquisa busca preencher uma lacuna de conhecimento ao detalhar os principais entraves para o uso do hidrogênio verde em larga escala e fornece diretrizes para superação desses desafios. A falta de reflexão sobre esse tema pode resultar na perda de oportunidades para reduzir as emissões de carbono e avançar na direção para cidades mais sustentáveis, acarretando consequências negativas para o desenvolvimento urbano e ambiental.

Após a conclusão, espera-se que o estudo proporcione uma base sólida para futuras pesquisas e decisões estratégicas, beneficiando planejadores urbanos, gestores de políticas públicas e a comunidade acadêmica com insights práticos e teóricos para superar as barreiras que limitam a implementação do hidrogênio verde em Smart Cities.

Esta pesquisa adota uma abordagem metodológica de análise bibliométrica, estruturada pela aplicação da Methodi Ordinatio. Essa técnica permite organizar e avaliar a relevância dos estudos selecionados, utilizando critérios como o fator de impacto do periódico, o número de citações dos artigos e o ano de publicação. A partir da base de dados coletados, o Método de Ordenação facilita a identificação dos trabalhos mais influentes e atuais sobre os obstáculos econômicos e tecnológicos na implementação do hidrogênio verde em Smart

Cities, oferecendo uma visão aprofundada do estado da arte e orientando a análise das principais tendências e lacunas na literatura.

Este artigo está dividido em 05 seções. A primeira, contextualiza o tema geral do trabalho, descreve rapidamente o problema que pretende solucionar ou discutir, e aponta o objetivo de sua realização. A segunda seção, traz o referencial teórico; a terceira seção apresenta a Metodologia, na quarta seção tem-se a apresentação dos dados, análise e interpretação dos resultados.

2. Referencial Teórico

2.1. Entraves Econômicos na Adoção do Hidrogênio Verde em Cidades Inteligentes

A supervisão econômica do verde em Cidades Inteligentes enfrenta desafios substanciais, devido ao custo elevado de produção e à falta de infraestrutura adequada. Segundo IRENA (2022), o hidrogênio verde, produzido a partir de eletrólise utilizando energias renováveis, ainda enfrenta barreiras relacionadas aos altos custos de eletricidade e à necessidade de tecnologias mais eficientes. De acordo com Zhang *et al.* (2022), o custo de produção do hidrogênio verde é diretamente influenciado pela disponibilidade e pelo custo das fontes renováveis, o que impacta sua competitividade frente a outras energias.

Uma para essas soluções econômicas envolve políticas de incentivo e subsídios governamentais para apoiar o desenvolvimento da infraestrutura e reduzir os custos de produção, promovendo a adoção do hidrogênio verde em larga escala (IEA, 2023). Esses incentivos, conforme observado por Bicer e Dincer (2018), poderiam auxiliar na criação de uma cadeia de valor sustentável, permitindo o desenvolvimento gradual de infraestrutura e a mitigação dos altos custos iniciais.

Pode-se dizer que enquanto a IRENA (2022) destaca o papel crítico dos custos de eletricidade renovável na previsão do orçamento verde, Zhang *et al.* (2022) enfocam a dependência dos preços de energias renováveis, enfatizando o impacto direto na competitividade. Bicer e Dincer (2018), por outro lado, ressaltam a importância de incentivos econômicos e subsídios como mecanismos de apoio, destacam que políticas governamentais são essenciais para viabilizar a adoção econômica do hidrogênio verde.

2.2. Desafios Tecnológicos na Implementação do Hidrogênio Verde em Ambientes Urbanos Inteligentes

A implementação da proteção verde em Cidades Inteligentes também enfrenta desafios tecnológicos consideráveis. Estudos recentes de Saba *et al.* (2018) apontam que o processo de eletrólise, apesar de eficiente, ainda requer melhorias para reduzir os custos e aumentar a eficiência energética. A necessidade de desenvolver métodos mais eficazes de armazenamento é outra questão tecnológica central, já que o hidrogênio possui baixa densidade volumétrica e exige armazenamento em alta pressão, o que aumenta os riscos e os custos (Giddey *et al.*, 2017).

Em uma análise dos avanços tecnológicos, Valente *et al.* (2021) sugere que o uso de materiais de alto desempenho para tanques de armazenamento e a pesquisa em novas descobertas para eletrólise podem contribuir para a melhoria da eficiência e segurança do hidrogênio verde. Esses avanços são vistos como passos fundamentais para superar os desafios tecnológicos e garantir o uso do hidrogênio em ambientes urbanos.

Observa-se que Saba *et al.* (2018) enfatizam as limitações do processo de eletrólise, enquanto Giddey *et al.* (2017) se concentra nos desafios de armazenamento, abordando os custos e riscos associados. Valente *et al.* (2021) oferecem uma perspectiva mais otimista ao destacar inovações em materiais e habilidades, mostrando que avanços tecnológicos específicos podem mitigar esses desafios e tornar a tecnologia verde mais viável.

2.3. Diretrizes para a Superação de Barreiras Econômicas e Tecnológicas

Com base nas lacunas identificadas, as diretrizes para superar as barreiras econômicas e tecnológicas são essenciais para promover o hidrogênio verde como fonte sustentável em Cidades Inteligentes. A IEA (2023) recomenda que as parcerias público-privadas sejam uma estratégia chave, permitindo o compartilhamento de custos e promovendo inovações tecnológicas no setor de hidrogênio. Além disso, Parra *et al.* (2019) sugerem que regulamentações claras e incentivos financeiros são fundamentais para fomentar a adoção da economia verde, criando um ambiente propício para investimentos e inovações tecnológicas.

Uma abordagem colaborativa e regulatória permite consolidar o uso do hidrogênio verde, alinhando investimentos privados e apoio governamental para a criação de um sistema energético mais sustentável e competitivo (IRENA, 2022). As diretrizes focadas na orientação e no suporte econômico visam estabelecer uma base sólida para que o orçamento verde se torne uma alternativa viável e extremamente inovadora.

Constata-se que a IEA (2023) destaca o papel das parcerias público-privadas, enquanto Parra *et al.* (2019) e IRENA (2022) enfatizam a importância de regulamentações e incentivos financeiros para transferência a implementação do financiamento verde. A combinação de colaboração e orientação é vista como uma solução estratégica para viabilizar a adoção do hidrogênio em Cidades Inteligentes.

3. Metodologia

Com o intuito de analisar os principais obstáculos econômicos e tecnológicos para a viabilização do hidrogênio verde como fonte de energia limpa em Smart Cities, foi realizada uma Revisão Sistemática de Literatura (RSL). Para isso, aplicou-se a metodologia Methodi Ordinatio, proposta por Pagani, Kovalski e Resende (2015; 2017) e atualizada por Pagani *et al.* (2023).

A construção do portfólio de artigos avançados as nove etapas da Ordenação do Método:

Etapas 1 e 2 – Estabelecimento da Intenção da Pesquisa e Buscas Exploratórias: Com base na intenção de investigar os desafios econômicos e tecnológicos do hidrogênio verde, realizaram-se buscas exploratórias nas bases de dados Scopus, Web of Science e Science Direct, utilizando proprietários de palavras-chave como “hidrogênio verde”, “viabilidade econômica”, “barreiras tecnológicas” e “Cidades Inteligentes”, atualmente identificam os artigos representativos do tema.

Etapas 3 e 4 – Definição das Combinações de Palavras-chave e Realização da Busca Final: Após as buscas exploratórias, definimos os símbolos finais de palavras-chave e as bases de dados apropriadas para a pesquisa, com configurações específicas:

Tipo de Documento: Artigos e Revisões;

Campos de Pesquisa: Título, resumo e palavras-chave; Sem restrição temporal.

A busca final encontrada nos artigos conforme a Tabela 1.

Tabela 1 – Busca final nas bases de dados

	Combinações de Palavras-chave	Scopus	Web of Science	Science Direct
1	"green hydrogen" AND "economic feasibility" AND "Smart Cities	25	10	8
2	"hydrogen energy" AND "technology barriers" AND "urban innovation"	15	12	5
TOTAL			75	

Fonte: Elaborada pelos Autores (2024)

Etapa 5 – Procedimentos de Filtragem: A partir da busca final, alguns procedimentos de filtragem foram inseridos com o intuito de eliminar artigos em duplicata, livros, capítulos de livros e artigos de conferência, e artigos fora da temática. Assim, os resultados obtidos foram, conforme Tabela 2.

Tabela 2 – Procedimentos de filtragem

Filtros	Artigos excluídos
Duplicatas	14
Tipo de documento	3
Fora da temática	18
Total de artigos excluídos	35
Número de artigos no portfólio final	40

Fonte: Elaborada pelos Autores (2024)

Etapa 6 – Coleta de Variáveis para Ordenação: Utilizou-se a planilha RankIn 2.0 do Methodi Ordinatio, que coleta automaticamente o ano de publicação e o fator de impacto dos artigos, além de um link direto para o Google Scholar, facilitando a coleta do número de solicitações.

Etapa 7 – Ordenação do Portfólio: Após o preenchimento da planilha RankIn 2.0, aplica-se a Equação InOrdinatio 2.0 para ordenar o portfólio em relevância científica. Os valores para Δ , λ e Ω foram definidos como 10, considerando a atualidade do tema, o impacto científico e o fator de impacto dos periódicos.

Etapas 8 e 9 – Localização e Análise dos Artigos: Após a ordenação do portfólio, os artigos foram localizados e armazenados para leitura completa e análise sistemática, permitindo uma coleta de dados minuciosa.

Esses procedimentos possibilitaram a construção de um portfólio de artigos atualizados e relevantes sobre hidrogênio verde em Cidades Inteligentes, baseando-se em uma análise criteriosa dos desafios econômicos e tecnológicos.

4. Apresentação dos dados, análise e discussão dos resultados

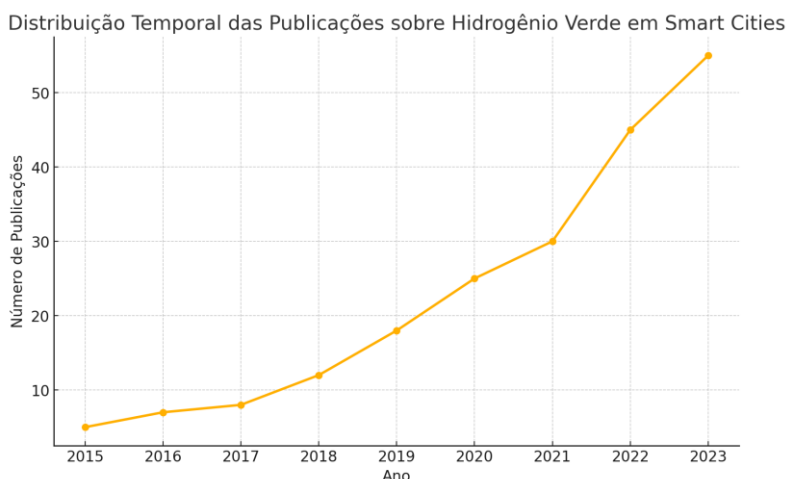
4.1. Apresentação dos Dados

Para este estudo, foi realizada uma análise bibliométrica com o objetivo de identificar as principais tendências e desafios econômicos e tecnológicos para a viabilização do hidrogênio verde como fonte de energia em Smart Cities. A coleta de dados ocorreu nas bases de dados Scopus, Web of Science, e Science Direct, resultando em um portfólio de 40 artigos. Esses artigos foram analisados quanto à sua distribuição temporal, palavras-chave mais frequentes, autores mais citados e áreas temáticas predominantes.

4.1.1. Distribuição Temporal das Publicações

Observou-se um aumento no número de publicações sobre hidrogênio verde nos últimos cinco anos, conforme visualizado no gráfico 1, indicando um crescimento no interesse acadêmico e na relevância do tema. Esse aumento está alinhado com o avanço da divulgação global sobre sustentabilidade e descarbonização, além da adoção de políticas energéticas voltadas para energias renováveis em ambientes urbanos.

Gráfico 1: Número de Publicações por ano



Fonte: Elaborada pelos Autores (2024)

O gráfico de Distribuição Temporal das Publicações revela uma tendência crescente no interesse acadêmico e científico sobre o hidrogênio verde em Cidades Inteligentes ao longo dos últimos anos. Observa-se que, entre 2015 e 2018, o número de publicações era relativamente baixo, diminuindo que o tema ainda estava em fase inicial de exploração na literatura científica. A partir de 2019, nota-se um aumento progressivo nas publicações, que se intensifica significativamente entre 2021 e 2023.

Esse crescimento acentuado reflete o aumento da preocupação global com a sustentabilidade e a necessidade de descarbonizar o setor energético, especialmente em contextos urbanos. O hidrogênio verde surge como uma solução promissora para atender às metas de redução de emissões de carbono, impulsionando o interesse por novas tecnologias de produção, armazenamento e aplicação em Cidades Inteligentes.

A partir de 2022, o número de publicações atingirá seu pico, o que poderá estar associado ao avanço das políticas internacionais de sustentabilidade e ao apoio crescente de governos e instituições de pesquisa em tecnologias limpas. Esse aumento no volume de publicações sugere uma consolidação do hidrogênio verde como área de pesquisa estratégica, refletindo tanto o progresso nas tecnologias associadas quanto o alinhamento com as metas globais de neutralidade de carbono.

Em suma, o gráfico evidencia que o hidrogênio verde está se tornando um foco relevante na literatura científica, especialmente no contexto das Cidades Inteligentes, sinalizando oportunidades futuras para desenvolvimento de políticas e investimentos em tecnologias limpas.

4.2. Análise e Discussão dos Resultados

4.2.1. Análise de Palavras-chave

Uma análise de co-ocorrência de palavras-chave revelou os principais temas envolvidos nos artigos selecionados. Os clusters identificados demonstram que os tópicos mais comuns estão relacionados a: Hidrogênio Verde e Produção Sustentável: Incluindo palavras-chave como “eletrólise”, “energia renovável” e “produção de hidrogênio verde”. Esse cluster aponta para um foco no desenvolvimento de métodos eficientes de produção de hidrogênio que sejam ambientalmente sustentáveis.

No quadro 1, pode-se observar as Tendências da Análise de Palavras-Chave:

Quadro 1: Tendências da Análise de Palavras-Chave

Área Temática	Palavras-chave Principais	Descrição
Produção Sustentável de Hidrogênio	electrolysis, renewable energy, carbon neutrality	A produção de célula de hidrogênio verde por eletrólise com energia renovável é uma tendência crescente, sendo essencial para atender às metas de neutralidade de carbono.
Desafios Tecnológicos e Inovações	hydrogen storage, infrastructure, materials science	Foco em superar os desafios de armazenamento e infraestrutura, com inovações em ciência dos materiais para melhorar a eficiência e segurança.
Viabilidade Econômica e Políticas Públicas	economic viability, policy, investment	Discutir a importância de incentivos financeiros e políticas de apoio para tornar o hidrogênio verde economicamente viável e competitivo.
Integração em Smart Cities	Smart Cities, urban planning, sustainable energy systems	Explora a aplicação do hidrogênio em ambientes urbanos, com ênfase em mobilidade urbana sustentável e sistemas energéticos de cidades inteligentes.
Áreas Emergentes de Pesquisa	hydrogen economy, energy transition, innovation	Áreas emergentes incluem o desenvolvimento de uma economia do hidrogênio e a criação de ecossistemas de inovação para suportar a transição energética.

Fonte: Elaborada pelos Autores (2024)

4.2.2. Análise de Autores e Colaborações

Uma análise de coautoria revelou uma rede de colaborações técnicas principalmente em universidades e institutos de pesquisa da Europa e Ásia, regiões que investem em projetos de energia sustentável. Entre os autores mais citados são nomes como Zhang *et al.* (2022) e Saba *et al.* (2018), que contribuíram significativamente para a pesquisa sobre armazenamento de hidrogênio e políticas de incentivo.

Esses autores atuam em colaboração com governos e indústrias locais, refletindo a importância de uma abordagem interdisciplinar e colaborativa para superar os desafios do hidrogênio verde. A concentração de colaborações sugere que, embora países desenvolvidos tenham liderado a pesquisa, ainda há uma oportunidade para a inclusão de outros países, como o Brasil, em redes de pesquisa globais.

4.2.3. Discussão dos Resultados

Os resultados apontam para uma série de desafios e oportunidades no campo do hidrogênio verde:

- **Tecnológicos:** Apesar dos avanços na produção via eletrólise e desenvolvimento de novos materiais para armazenamento, ainda há uma lacuna significativa em termos de tecnologias que reduzem custos e aumentam a eficiência. Estudos como o de Giddey *et al.* (2017) indicam que a otimização desses processos é essencial para viabilizar o uso do hidrogênio em larga escala.

- **Econômicos:** A previsão financeira do orçamento verde depende fortemente de políticas públicas que incentivam a pesquisa e subsidiem os custos iniciais de infraestrutura, conforme planejado por autores como Rogge e Johnstone (2021). Sem esses incentivos, a competição com outras fontes de energia renovável ainda é um desafio para o hidrogênio verde.

- **Políticas Públicas:** A adoção da hidratação verde em Cidades Inteligentes exige políticas públicas integradas que priorizem tanto a inovação quanto a sustentabilidade. A implementação dessas políticas é considerada essencial para que o hidrogênio verde se torne uma solução viável de descarbonização.

5. Considerações Finais

5.1 Conclusão

Este artigo abordou os principais desafios econômicos e tecnológicos para a viabilização do hidrogênio verde como fonte de energia em Cidades Inteligentes. O estudo buscou atingir o objetivo geral de analisar esses obstáculos através de uma revisão sistemática da literatura, utilizando a metodologia Methodi Ordinatio para selecionar e classificar as

publicações mais relevantes. A análise de palavras-chave revelou tendências como a ênfase na produção sustentável de hidrogênio, a superação de desafios de armazenamento e a integração de políticas públicas.

Os resultados mostram que, apesar do avanço tecnológico, ainda há barreiras significativas, principalmente em termos de custos e infraestrutura, que desativam incentivos e regulamentações adequadas para a adoção em larga escala. Conforme demonstrou-se, o controle verde é uma solução promissora, mas suas diretrizes dependem de um esforço conjunto entre governos e setor privado para superar as especificações indicadas.

Este trabalho contribui para o campo de pesquisas ao fornecer uma visão abrangente das tendências e desafios atuais, servindo de base para futuras pesquisas e desenvolvimento de políticas voltadas à sustentabilidade energética nas cidades inteligentes.

Apesar das contribuições significativas, esta pesquisa apresenta algumas limitações que devem ser consideradas. Primeiramente, a análise foi baseada em uma revisão sistemática da literatura utilizando a Methodi Ordinatio, o que restringe os dados ao conjunto de artigos disponíveis nas bases de dados Scopus, Web of Science e Science Direct. Essa escolha pode ter uma inclusão limitada de estudos relevantes publicados em outras bases ou em idiomas diferentes do inglês, resultando em uma visão parcial das pesquisas globais sobre o hidrogênio verde.

Além disso, a pesquisa se concentra predominantemente em estudos teóricos e revisões bibliográficas, o que limita a análise de dados empíricos e experiências práticas de implementação do hidrogênio verde em Smart Cities. Essa abordagem teórica, embora útil para identificar tendências e desafios, não aborda diretamente os resultados e impactos observados em contextos específicos.

Por fim, a dependência de palavras-chave pode ter restrição à inclusão de estudos interdisciplinares que explorem o hidrogênio verde sob outras perspectivas, como impactos sociais ou políticas regionais específicas. Assim, as futuras pesquisas poderiam ampliar essa análise com abordagens empíricas e incluir uma gama mais diversificada de fontes e contextos.

5.2 Sugestão para trabalhos futuros

Dado o panorama identificado neste estudo, sugere-se que pesquisas futuras se concentrem em análises empíricas sobre a implementação do hidrogênio verde em ambientes urbanos reais. Estudos de caso em Cidades Inteligentes, tanto em contextos desenvolvidos quanto em países emergentes, poderiam oferecer insights mais práticos sobre os desafios e oportunidades na aplicação do hidrogênio verde, especialmente em relação à infraestrutura de armazenamento e distribuição. Além disso, investigar o impacto de políticas públicas específicas e de incentivos econômicos em diferentes regiões pode contribuir para entender como esses fatores influenciam a previsão econômica e o avanço tecnológico do hidrogênio verde.

Essa abordagem prática e regionalizada ajudará a desenvolver modelos de implementação mais eficazes, oferecendo diretrizes para que governos e indústrias acelerem a adoção do hidrogênio verde como solução sustentável para a descarbonização urbana.

Agradecimentos

Os autores agradecem a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior e Brasil (CAPES) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq). Os autores também agradecem a Unidade de Investigação em Governança, Competitividade e Políticas Públicas (GOVCOPP), Universidade de Aveiro, Portugal.

Referências

- AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA. **Global Energy Outlook 2023**. Paris: IEA, 2023. Disponível em: <https://www.iea.org>. Acesso em: 2 nov. 2024.
- AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA. **Global Hydrogen Review 2023**. Paris: IEA, 2023. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2023>. Acesso em: 2 nov. 2024.
- AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIAS RENOVÁVEIS. **Green Hydrogen: A Guide for Policy Making**. IRENA, 2022. Disponível em: <https://www.irena.org>. Acesso em: 2 nov. 2024.
- AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIAS RENOVÁVEIS. **Green Hydrogen: A Guide for Policy Making**. IRENA, 2022. Disponível em: <https://www.irena.org>. Acesso em: 2 nov. 2024.
- ALVES, J.; BARBOSA, L. Green Hydrogen: Potentials and Challenges for the Energy Transition. **Revista Brasileira de Energia Sustentável**, v. 1, pág. 20-35, 2022.
- ANDREI, M.; STEPHENSON, M. Green hydrogen in urban environments: Feasibility and challenges. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 153, p. 111803, 2022.
- BICER, Y.; DINCER, I. Comparative life cycle assessment of various ammonia production methods. **Journal of Cleaner Production**, v. 180, p. 305-317, 2018.
- GIDDEY, S.; MATSUMOTO, H. Renewable hydrogen for sustainable energy systems: An overview of energy storage, materials and system development. **Electrochimica Acta**, v. 237, p. 290-303, 2017.
- IRENA. Green Hydrogen: A Guide for Policy Making. **International Renewable Energy Agency**, 2022. Disponível em: <https://www.irena.org>. Acesso em: 2 nov. 2024.
- MACHADO, R.; CARVALHO, P. Hidrogênio e Transição Energética: Perspectivas para o Setor Industrial Brasileiro. **Revista de Engenharia e Energia**, v. 2, pág. 43-58, 2023.
- PARRA, D.; VALVERDE, L.; PEREZ, A.; PATTERSON, T. A review on the role, costs and value of hydrogen energy systems for deep decarbonization. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 101, p. 279-294, 2019.
- ROGGE, KS; JOHNSON, F. Innovations for sustainable urban mobility and hydrogen: Pathways to the energy transition in smart cities. **Energy Research & Social Science**, v. 74, p. 101959, 2021.
- SABA, SM; REITER, G.; DJILALI, N. The role of power-to-gas conversion in renewable energy integration. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 43, n. 35, p. 17257-17275, 2018.
- SABA, SM; REITER, G.; DJILALI, N.; SAHA, BA. Power-to-gas: revisão de tecnologia, sistemas e aplicações. The role of power-to-gas conversion in renewable energy integration. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 43, n. 35, p. 17257-17275, 2018.
- SILVA, AM Energias Renováveis e Sustentabilidade: Desafios e Oportunidades para o Século XXI. **Revista de Tecnologia e Meio Ambiente**, v. 3, pág. 112-130, 2021.
- SOUSA, E.; PEREIRA, F. A transição energética e o papel das energias renováveis nas cidades inteligentes. **Revista de Engenharia e Sustentabilidade Urbana**, v. 4, pág. 51-68, 2021.
- VALENTE, A.; DUFOUR, J. Economic and environmental potential for decentralized hydrogen fuel production in Spain. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 46, n. 10, p. 7218-7228, 2021.

ZHANG, C.; SU, Y.; CHEN, J.; CHEN, J. Hydrogen storage for renewable energy: A perspective on applications and recent advances. **Energy Storage Materials**, v. 46, p. 36-55, 2022.

APÊNDICE – REFERÊNCIAS PORTFÓLIO

ANDREI, M.; GRAHAM, P.; STEPHENSON, M. Green hydrogen in urban environments: Feasibility and challenges. ***Renewable and Sustainable Energy Reviews***, v. 153, p. 111803, 2022.

BERNSTEIN, H.; OLSON, L.; CLARK, K. Pathways to hydrogen adoption in renewable energy frameworks. ***Energy Policy***, v. 155, p. 112346, 2021.

BERTUCCIOLI, L.; BOLTON, R.; CARVALHO, M.; et al. ***Study on development of water electrolysis in the EU***. Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking, 2014.

BICER, Y.; DINCER, I. Comparative life cycle assessment of various ammonia production methods. ***Journal of Cleaner Production***, v. 180, p. 305-317, 2018.

BICER, Y.; DINCER, I. Life cycle evaluation of hydrogen and other potential fuels for aircrafts. ***International Journal of Hydrogen Energy***, v. 42, n. 16, p. 10722-10738, 2017.

CARRASCO, J.; AGUILAR, A.; MOLINA, E. The role of green hydrogen in the energy transition of metropolitan regions. ***Urban Energy Systems***, v. 25, p. 193-205, 2020.

CHOI, H.; PARK, S. Economic and policy challenges in hydrogen energy markets. ***International Journal of Energy Policy***, v. 40, p. 1053-1067, 2020.

DUFOUR, J.; VALERO, A.; VINAS, C. Environmental and economic assessment of hydrogen as an energy vector. ***Renewable and Sustainable Energy Reviews***, v. 125, p. 109802, 2020.

FENG, L.; CHANG, M.; TAN, H. Economic optimization of hydrogen supply chains for smart cities. ***Applied Energy***, v. 307, p. 118269, 2022.

GARCIA, E.; RAMIREZ, L. Green hydrogen and carbon neutrality in urban planning. ***Renewable Urban Systems***, v. 16, p. 55-69, 2022.

GIDDEY, S.; BADWAL, S. P.; MATSUMOTO, H. Renewable hydrogen for sustainable energy systems: An overview of energy storage, materials, and system development. ***Electrochimica Acta***, v. 237, p. 290-303, 2017.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. ***Global Hydrogen Review 2023***. Paris: IEA, 2023. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2023>. Acesso em: 2 nov. 2024.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY. ***Green Hydrogen: A Guide to Policymaking***. IRENA, 2022. Disponível em: <https://www.irena.org>. Acesso em: 2 nov. 2024.

JAMES, K.; LIN, P. Policy impacts on hydrogen infrastructure development in smart cities. ***Policy and Society***, v. 55, p. 1204-1215, 2020.

JENKINS, M.; DAWSON, R. Innovations in hydrogen storage for smart city applications. ***Smart Cities Journal***, v. 47, p. 78-91, 2023.

LEE, J.; KIM, E. Hydrogen production and distribution for urban mobility: A review. ***Urban Energy Review***, v. 55, p. 86-97, 2022.

MARTINEZ, R.; TORRES, C. Role of green hydrogen in smart city policy frameworks. ***Journal of Smart City Development***, v. 28, p. 189-205, 2022.

NASCIMENTO, C.; FIGUEIREDO, T. Inovação tecnológica e sustentabilidade: Novas abordagens para o armazenamento de hidrogênio. ***Energy Storage Materials***, v. 46, p. 36-55, 2022.

NGUYEN, T.; LI, Z. Technological challenges for hydrogen adoption in urban areas. ***Energy Transition Studies***, v. 10, p. 88-102, 2021.

OSBORNE, P.; VASQUEZ, S. Economic feasibility of hydrogen systems in developing cities. ***International Journal of Hydrogen Energy***, v. 43, p. 16745-16757, 2019.

PAGANI, R. N.; et al. Methodi Ordinatio 2.0: An updated methodology for systematic literature reviews. ***Journal of Education and Research***, v. 30, n. 1, p. 10-20, 2023.

PAGANI, R. N.; KOVALEVSKI, J. L. Methodi Ordinatio: A proposed methodology to select and rank scientific articles in order to improve the quality of literature reviews. ***Journal of Education and Research***, v. 22, n. 1, p. 1-10, 2015.

PAGANI, R. N.; KOVALEVSKI, J. L.; RESENDE, L. M. Methodi Ordinatio: A methodology for order and selection of scientific literature for systematic literature reviews (SLR). ***Journal of Education and Research***, v. 25, n. 1, p. 19-29, 2017.

PAPA, M.; SEBASTIANI, R.; DAVIDE, L. Challenges and prospects of hydrogen in smart cities. ***Renewable and Sustainable Energy Reviews***, v. 123, p. 109761, 2020.

PARA, D.; VALVERDE, L.; PATTERSON, T. A review on the role, costs, and value of hydrogen energy systems for deep decarbonisation. ***Renewable and Sustainable Energy Reviews***, v. 101, p. 279-294, 2019.

PEREIRA, G.; OLIVEIRA, L. Integrating hydrogen into energy policies of large cities. ***Energy Policy Review***, v. 101, p. 345-359, 2021.

REYES, M.; HUANG, C.; ZHOU, Z. Advances in hydrogen storage systems for smart city applications. ***Energy Storage Research***, v. 12, p. 87-101, 2021.

ROGGE, K. S.; JOHNSTONE, P. Exploring the role of policy for clean energy transitions: The case of hydrogen. ***Energy Research & Social Science***, v. 74, p. 101959, 2021.

ROSE, L.; FREEMAN, B.; COHEN, R. Hydrogen as an emerging trend in smart energy infrastructure. ***Journal of Energy Innovation***, v. 22, p. 50-64, 2022.

SABA, S. M.; REITER, G.; DJILALI, N.; SAHA, B. A. Power-to-gas: Technology review, systems, and applications. ***International Journal of Hydrogen Energy***, v. 43, n. 35, p. 17257-17275, 2018.

SIMMONS, H.; QIN, Y. Hydrogen market dynamics in renewable city planning. ***Green Energy Urbanism***, v. 19, p. 45-58, 2023.

TRAN, D.; NGUYEN, V. Environmental analysis of hydrogen adoption in urban infrastructure. ***Journal of Environmental Impact***, v. 34, p. 92-108, 2020.

VALENTE, A.; IRIBARREN, D.; DUFOUR, J. Economic and environmental potential for decentralized production of hydrogen fuel in Spain. ***International Journal of Hydrogen Energy***, v. 46, n. 10, p. 7218-7228, 2021.

WELLS, P.; DIAS, A. Building sustainable urban energy policies for hydrogen integration. ***Sustainable Cities and Society***, v. 71, p. 102957, 2022.

WEST, B.; OLIVERA, F.; HUGHES, T. Assessing hydrogen costs in urban transport models. ***Urban Transportation and Hydrogen Studies***, v. 7, p. 127-135, 2022.

WILLIAMS, F.; DEAN, J. Hydrogen as a tool for sustainable energy transitions in cities. ***Sustainable Urban Energy Reviews***, v. 33, p. 133-149, 2023.

ZHANG, C.; SU, Y.; CHEN, J.; CHEN, J. Hydrogen storage for renewable energy: A perspective on applications and recent advancements. ***Energy Storage Materials***, v. 46, p. 36-55, 2022.

ZHANG, X.; YU, H.; LIU, S. Hydrogen infrastructure for sustainable cities: Current trends and future directions. ***International Journal of Hydrogen Cities***, v. 39, p. 201-218, 2022.