



Geração de energia limpa por meio do hidrogênio verde: uma revisão da literatura

Christian de Araújo Silva ¹, Daniel José Toffoli ², Anderson Clayton Nascimento Ribeiro ³

¹ *Graduando em Fabricação mecânica, Fatec Prof Miguel Reale, Brasil. (christian.silva19@fatec.sp.gov.br)*

² *Mestre em Ciência na área de Tecnologia Nuclear - Materiais pelo IPEN, Brasil.*

³ *Doutor em Ciências e Tecnologias Espaciais pelo Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), Brasil.*

Histórico do Artigo: Submetido em: 20/05/2025 – Revisado em: 16/06/2025 – Aceito em: 13/07/2025

RESUMO

A transição para fontes de energia mais limpas tem destacado o hidrogênio verde como uma solução promissora para reduzir emissões de gases poluentes. Produzido através da eletrólise da água usando energias renováveis como solar e eólica, o hidrogênio verde se diferencia dos demais tipos, que dependem de combustíveis fósseis para se tornarem usuais. No entanto, sua adoção enfrenta desafios como custos e baixa eficiência das tecnologias atuais, como a eletrólise alcalina e a de membrana de troca protônica (PEM). Além disso, o armazenamento e transporte do hidrogênio se torna difícil devido à sua baixa densidade, que exige soluções avançadas, como tanques de alta pressão ou hidretos metálicos. Embora haja avanços na redução de custos e integração com fontes renováveis, o hidrogênio verde ainda não é competitivo com os combustíveis fósseis. Sua produção em larga escala requer investimentos significativos em infraestrutura, regulamentação e eficiência na cadeia de suprimentos. Países como Japão, EUA, China, Alemanha e Coreia do Sul estão investindo fortemente nesse setor. No Brasil, o hidrogênio verde está sendo explorado por meio de incentivos e regulamentações, com planos para torná-lo líder na produção até 2030. Apesar das dificuldades, o hidrogênio verde tem potencial para ser uma fonte chave de energia no futuro.

Palavras-Chaves: Hidrogênio verde; combustíveis fósseis; pegada de carbono; sustentabilidade; energia renovável.

Clean energy generation through green hydrogen: a literature review

RESUMEN

La transición hacia fuentes de energía más limpias ha destacado al hidrógeno verde como una solución prometedora para reducir las emisiones de gases contaminantes. Producido a través de la electrólisis del agua utilizando energías renovables como la solar y la eólica, el hidrógeno verde se diferencia de los demás tipos, que dependen de combustibles fósiles para volverse habituales. Sin embargo, su adopción enfrenta desafíos como los costos y la baja eficiencia de las tecnologías actuales, como la electrólisis alcalina y la de membrana de intercambio protónico (PEM). Además, el almacenamiento y transporte del hidrógeno se vuelve complicado debido a su baja densidad, lo que exige soluciones avanzadas, como tanques de alta presión o hidruros metálicos. Aunque ha habido avances en la reducción de costos y la integración con fuentes renovables, el hidrógeno verde aún no es competitivo con los combustibles fósiles. Su producción a gran escala requiere inversiones significativas en infraestructura, regulación y eficiencia en la cadena de suministro. Países como Japón, EE. UU., China, Alemania y Corea del Sur están invirtiendo fuertemente en este sector. En Brasil, el hidrógeno verde está siendo explorado a través de incentivos y regulaciones, con planes para convertirlo en líder en producción para 2030. Apesar de las dificultades, el hidrógeno verde tiene potencial para ser una fuente clave de energía en el futuro.

Palabras clave: hidrógeno verde; combustibles fósiles; huella de carbono, sostenibilidad; energía renovable.

Araújo, C., José, D., Clayton, A. (2025). Geração de energia limpa por meio de hidrogênio verde: uma revisão da literatura. *Meio Ambiente (Brasil)*, v.7, n.3, p.133-143.



Direitos do Autor. A Meio Ambiente (Brasil) utiliza a licença *Creative Commons* - CC BY 4.0.

1. Introdução

A mudança global em direção a fontes de energia mais limpas e sustentáveis tornou-se uma prioridade crítica em resposta ao aumento da demanda por energia e à necessidade urgente de combater as mudanças climáticas. Entre as soluções mais promissoras para a descarbonização de setores-chave, como geração de energia, transporte, indústria pesada e armazenamento de energia, está o hidrogênio verde. O hidrogênio verde é gerado pela separação das moléculas de água usando eletrólise, um processo impulsionado por fontes de energia renováveis, como energia eólica e solar. Esse método o distingue de outros tipos de hidrogênio, como o hidrogênio cinza e o hidrogênio azul, que são produzidos com o uso de combustíveis fósseis e resultam na emissão de gases de efeito estufa (Irena, 2022).

No entanto, sua adoção enfrenta desafios tecnológicos, econômicos e logísticos. As tecnologias de produção atuais, como a eletrólise de membrana de troca protônica (PEM) e a eletrólise alcalina, ainda têm custos de produção elevados e baixa eficiência (Iea, 2021). O armazenamento e transporte de hidrogênio também apresentam dificuldades devido à sua baixa densidade energética e alta volatilidade, exigindo soluções avançadas, como tanques de alta pressão e sistemas criogênicos (Zhang et al., 2020; Glenk & Reichelstein, 2019). O armazenamento de hidrogênio por absorção em materiais, como hidretos metálicos à base de alumínio e sódio, apresenta desafios para sua aplicação prática. Esses materiais absorvem e liberam hidrogênio quando aquecidos, mas exigem altas temperaturas para a liberação do hidrogênio, o que limita sua utilização. Além disso, as variações de temperatura podem reduzir sua vida útil. No entanto, o armazenamento em hidretos metálicos é considerado seguro, pois a baixa pressão interna evita vazamentos. Por outro lado, é fundamental controlar a pureza do hidrogênio para prevenir reações indesejadas (Zhang et al., 2020).

A viabilidade econômica do hidrogênio verde é outro desafio, pois, apesar dos avanços na redução dos custos dos eletrólitos e na integração de energia renovável, ele ainda não é competitivo com os combustíveis fósseis. Para produção e armazenamento em larga escala, serão necessários investimentos significativos em infraestrutura, apoio regulatório e eficiência da cadeia de suprimentos (Irena, 2021).

À luz desses desafios, este artigo busca examinar criticamente o panorama atual das tecnologias de produção e armazenamento de hidrogênio verde, enfatizando suas vantagens e desvantagens. A revisão também avalia a viabilidade econômica dessas tecnologias e investiga seu potencial para moldar os futuros sistemas globais de energia.

2. Materiais e métodos

Este trabalho configura-se como uma revisão narrativa da literatura, com foco na análise crítica de estudos acadêmicos, relatórios técnicos e publicações especializadas sobre a produção e o armazenamento de hidrogênio verde. A revisão narrativa permite ampla flexibilidade na seleção das fontes e na abordagem dos temas, sendo adequada para integrar diferentes tipos de conhecimento e contextualizações sobre um campo ainda em consolidação.

2.1 Seleção das fontes

As fontes foram selecionadas com base em sua relevância temática, atualidade e representatividade, sem a pretensão de exaustividade ou de aplicação de protocolos sistemáticos. Foram consultadas bases amplamente utilizadas na área, como Scopus, Web of Science, IEEE Xplore e Google Scholar, além de relatórios de agências internacionais (IEA, IRENA). Embora o critério temporal tenha priorizado estudos publicados nos últimos dez anos, a revisão manteve caráter exploratório e integrativo, conforme proposto para revisões narrativas.

2.2 Critérios de inclusão e exclusão

Para garantir a relevância e a qualidade da revisão, foram definidos os seguintes critérios de inclusão e exclusão, como mostram as tabelas 1 e 2, respectivamente.

Tabela 1 – Parâmetros de seleção
Table 1 – Selection parameters

Parâmetros de inclusão
Estudos que abordem diretamente as tecnologias de produção e armazenamento de hidrogênio verde.
Publicações que discutam a viabilidade econômica e as barreiras à adoção em larga escala do hidrogênio verde.
Relatórios técnicos e artigos que apresentem dados sobre o impacto ambiental e o potencial do hidrogênio verde em sistemas energéticos globais.

Fonte: Elaborada pelos autores (2025)
Source: Elaborated by the authors

Tabela 2 – Parâmetros de seleção
Table 2 – Selection parameters

Parâmetros de exclusão
Estudos focados em outras formas de hidrogênio (cinza, azul, etc.) que não abordam comparativamente o hidrogênio verde.
Artigos que não apresentam revisão por pares ou que foram publicados em fontes não reconhecidas academicamente.
Artigos que não apresentam revisão por pares ou que foram publicados em fontes não reconhecidas academicamente.

Fonte: Elaborada pelos autores (2025)
Source: Elaborated by the authors

2.3 Coleta de dados

A coleta de dados consistiu na identificação e obtenção de artigos científicos, capítulos de livros e relatórios técnicos que se alinham com os critérios de inclusão definidos. Os dados foram extraídos manualmente, focando em informações pertinentes aos objetivos do estudo, como descrições de tecnologias de produção, metodologias de armazenamento, análises de custos e desafios técnicos.

Tabela 3 – Análise quantitativa de dados pesquisados
Table 3 – Quantitative analysis of research data

Categoria	Quantidade
Artigos científicos	19
Relatórios institucionais	7

Capítulos de livros/outros	3
Total	29

Fonte: elaborada pelos autores (2025)
Source: Elaborated by the authors (2025)

Foram consultados 29 documentos no total, sendo: 19 artigos científicos provenientes de bases como Scopus, Web of Science, IEEE Xplore e Google Scholar; 7 relatórios técnicos elaborados por instituições reconhecidas como a International Energy Agency (IEA), a International Renewable Energy Agency (IRENA), o Ministério de Minas e Energia (MME), e a Empresa de Pesquisa Energética (EPE) e 3 capítulos de livros e publicações institucionais complementares, utilizados para fornecer contexto histórico e teórico.

A seleção foi realizada manualmente com base nos critérios de inclusão estabelecidos, priorizando estudos publicados entre 2013 e 2024, em português e inglês. A coleta focou em informações sobre tecnologias de produção, métodos de armazenamento, análises econômicas e políticas públicas relacionadas ao hidrogênio verde.

2.4 Análise dos dados

Os dados coletados foram organizados e analisados de forma qualitativa, seguindo uma abordagem de análise temática. A análise temática permitiu a identificação de padrões recorrentes e temas centrais, como as principais tecnologias de eletrólise, os métodos de armazenamento, as questões econômicas e os desafios tecnológicos. Além disso, foi realizada uma análise comparativa entre as diferentes tecnologias de produção e armazenamento, destacando suas vantagens e desvantagens.

Os resultados da análise foram organizados em categorias que refletem os principais temas do estudo: (1) tecnologias de produção de hidrogênio verde; (2) armazenamento e transporte; (3) viabilidade econômica; e (4) potencial futuro e desafios. Essa estruturação permitiu uma síntese clara e coesa dos achados, facilitando a identificação de lacunas na literatura e a formulação de recomendações para futuras pesquisas.

2.5 Validação e limitações

Embora o estudo tenha buscado incluir uma ampla gama de fontes e perspectivas, ele é limitado pela disponibilidade de estudos recentes e pela natureza dinâmica das tecnologias energéticas. Algumas das tecnologias analisadas estão em desenvolvimento e podem evoluir rapidamente, o que pode alterar as conclusões em curto prazo. Ademais, a análise se concentrou em publicações disponíveis em inglês e português, o que pode excluir contribuições relevantes em outras línguas.

A validação dos achados foi realizada através da triangulação das informações obtidas, comparando os dados extraídos de diferentes fontes e verificando a consistência entre eles. Isso permitiu uma maior confiabilidade nas conclusões apresentadas, apesar das limitações inerentes ao estudo.

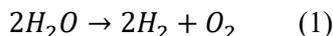
3. Desenvolvimento

3.1 Conceito e contexto do hidrogênio verde

A sustentabilidade é uma temática que vem sendo muito abordada pelos estudiosos nas pesquisas sobre o hidrogênio verde, todos buscando desenvolver combustíveis que possam substituir aqueles à base de carbono, tornando o hidrogênio verde um alicerce para alcançar essa mudança (Panah et al., 2022). O hidrogênio verde é tratado como um dos tipos de matriz energética mais promissoras para o futuro; diversas organizações nacionais e internacionais estão buscando padronização e formulações de políticas públicas, visando um futuro

com uma drástica redução nas emissões de carbono. Potências mundiais estão realizando pesquisas sobre hidrogênio verde, e as que mais se destacam são Japão, EUA e China, acompanhadas de Alemanha e Coreia do Sul, tendo a China como pioneira na produção, na aplicação e no armazenamento do produto (Abad & Dodds, 2020).

O hidrogênio verde é produzido através da eletrólise da água representada pela equação (1):



realizando essa transformação através de fontes renováveis de energia para facilitar a quebra das moléculas (Kumar et al., 2022). Esse processo ocorre quando a molécula de água é dividida em oxigênio (O_2) e hidrogênio (H_2), sem gerar emissões diretas de dióxido de carbono para a atmosfera (Carmo et al., 2013).

A produção de hidrogênio azul ocorre por meio da reforma do vapor do gás natural, processo que consiste na separação da molécula de um átomo de H_2 e CO_2 (Pruvost et al., 2022). Aproximadamente 85% a 95% do dióxido de carbono gerado é capturado e armazenado, contudo, uma parte do gás liberado não pode ser retida.

O hidrogênio cinza é criado por meio de fontes de energia não renováveis, como gás natural e carvão. Nesse modelo de produção, o CO_2 gerado não é capturado, sendo liberado totalmente na atmosfera (Pruvost et al., 2022).

O hidrogênio turquesa é gerado por meio da pirólise do metano, com o dióxido de carbono sendo armazenado de forma sólida (Banu et al., 2023). O hidrogênio laranja é produzido por meio de eletrólise utilizando a rede elétrica, podendo gerar emissão indireta de CO_2 , dependendo da matriz energética usada em sua produção (Incer-Valverde et al., 2023). Já o hidrogênio rosa é produzido por meio de energia nuclear e água (Shirizadeh et al., 2023). Por fim, o hidrogênio preto que é criado a partir do carvão betuminoso pelo processo de gaseificação, resultando em altas quantidades de poluentes lançadas na atmosfera.

3.2 Tecnologias de produção, armazenamento e distribuição de hidrogênio verde

O hidrogênio é o elemento mais comum e abundante no planeta; no entanto, é normal que se encontre esse átomo ligado a outro átomo de hidrogênio formando uma molécula e, para utilizar o hidrogênio como fonte de energia, é necessário separar os átomos ligados como por exemplo da água (H_2O). Existem diversos processos que podem fazer essa separação, sendo diferenciados pelo tipo de tecnologia usada, conforme destaca a tabela 4:

Tabela 4 – Classificação de produção de hidrogênio
Table 4 – Hydrogen production classification

Classificação

Hidrogênio baseado em eletricidade é o produzido através do processo de eletrólise da água mostrado na equação (1), que consiste em usar um eletrolisador alimentado por eletricidade para realizar a separação dos átomos. As emissões de gases causadas nesse processo dependem de como é produzida (Bezerra, 2021).

Hidrogênio renovável, também conhecido como hidrogênio limpo, é produzido por meio do processo de eletrólise, através de um eletrolisador alimentado por eletricidade originária de fontes renováveis. Nesse tipo de processo as emissões de gases do efeito estufa é praticamente nula, outro modo de produzir hidrogênio limpo é através do biogás ou da conversão bioquímica da biomassa, desde que atenda às normas e regras de sustentabilidade (Bezerra, 2021).

Hidrogênio baseado em fósseis utiliza combustíveis fósseis como base de produção que consiste em reformar o gás natural ou a gaseificação do carvão, esse modelo de produção representa a maior parte do hidrogênio produzido atualmente, mas com alta emissão de gases poluentes (Bezerra, 2021).

Fonte: Elaborada pelos autores (2025)
Source: Elaborated by the authors

A produção de hidrogênio verde ocorre principalmente por eletrólise da água, e as tecnologias mais comuns para essa eletrólise são a alcalina e a com membrana de troca de prótons (PEM). A eletrólise alcalina é uma tecnologia segura, eficaz e economicamente mais rentável, sendo mais barata e madura, mas possui menor eficiência e não é ideal para operação com fontes renováveis, como solar e eólica (Irena, 2021).

Em contrapartida, a eletrólise PEM (Proton Exchange Membrane) é uma tecnologia comercial mais avançada, utilizada em processos mais atuais. É adequada para integração com energias renováveis, mas ainda enfrenta desafios relacionados ao custo e à durabilidade dos materiais, especialmente os catalisadores à base de metais preciosos (Glenk & Reichelstein, 2019).

O armazenamento do hidrogênio é tratado como um dos principais desafios a serem resolvidos a curto espaço de tempo, e a consolidação de seu uso como fonte energética para o futuro passa essencialmente por esse avanço. Atualmente existem três maneiras diferentes de se armazenar o hidrogênio: na forma gasosa sob altas pressões, na forma líquida sob temperaturas criogênicas e na superfície ou dentro materiais sólidos e líquidos.

Na forma gasosa, o hidrogênio é comprimido em pressões entre 100 e 400 bar, podendo ser armazenado em compartimentos metálicos apropriados. Contudo, os custos operacionais elevados e a limitação de volume dificultam o armazenamento em grande escala (Andersson e Gronkvist, 2019). Além disso, o sistema gasoso apresenta riscos de vazamento sendo realizada a adição de odorizantes para detectar vazamentos e garantir a segurança no uso do hidrogênio (Mouli-Castillo et al., 2021). Na forma líquida, o hidrogênio é liquefeito a $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$, exigindo energia entre 20 e 40 MJ/kg e materiais isolantes para manter a temperatura. Apesar de ser um modelo consolidado, a liquefação apresenta altos valores na produção do hidrogênio e riscos de vazamentos (Cardella et al., 2017).

No modelo de armazenamento sólido, o hidrogênio se combina fisicamente ou quimicamente com outros materiais, sendo liberado por estímulos cinéticos, térmicos ou hidrólise. Em combinações físicas, o hidrogênio é absorvido em substratos, como nanotubos de carbono e polímeros porosos, por meio de interações de van der Waals (Pranchi et al, 2016). Em combinações químicas, há quimissorção que resulta na formação de hidretos metálicos e outros compostos químicos quando o hidrogênio interage com superfícies de metais ou ligas metálicas.

Dito isto, o hidrogênio é mais propenso a causar acidentes, como explosões, em comparação com outros combustíveis, devido a sua volatilidade. Vários estudos estão sendo realizados para avaliar os riscos relacionados ao hidrogênio, como o de (Mao et al, 2021), que desenvolveu métodos para gerenciar o armazenamento de grandes quantidades de hidrogênio e minimizar os riscos de acidentes.

Por fim, os tipos de hidrogênio mais promissores para o futuro dependem de uma junção de fatores como: tecnologia, custo, infraestrutura e aceitação social. Hidrogênio verde é o mais desejado em termos de sustentabilidade devido a seu grande potencial de reduzir a emissão de gases poluentes. Mesmo assim, a adesão ao hidrogênio azul pode ser mais imediata em relação ao hidrogênio verde, pois ele pode ser produzido com a infraestrutura de gás natural existente. No entanto, sua viabilidade depende do custo da captura de carbono, que precisa ser reduzido. Os hidrogênios rosas e turquesa também têm seu potencial, mas ainda estão em estágios mais iniciais e enfrentam desafios de adoção.

No geral, a diversificação das fontes de produção de hidrogênio será essencial para garantir que a demanda por energia limpa seja atendida de maneira eficiente e econômica. O avanço das tecnologias de captura de carbono e a redução dos custos de energias renováveis são determinantes para tornar o hidrogênio uma peça-chave na descarbonização global.

3.3 Aplicações do Hidrogênio Verde, desafios e barreiras

O hidrogênio verde tem potencial para ser a matriz energética mais utilizada. Estima-se que a produção de energia limpa por meio do hidrogênio verde tenha um aumento significativo nos próximos anos, visto que a União Europeia apresentou um plano ambicioso para reduzir suas emissões de carbono em até 90% (Zuben, 2022). Os países que mais investem, em termos de porcentagem do PIB, na geração e no armazenamento do hidrogênio verde, são Alemanha, China, Holanda, EUA e Austrália, com a criação de 5 megaprojetos voltados à produção de energia limpa (Zheng, 2021).

Na Alemanha, a reciclagem dos gases residuais da indústria siderúrgica possibilita a produção de energia com a captura de CO₂, transformando esse composto em fontes de energia e produtos químicos valiosos sem emissão de carbono. Recentemente, o país aderiu o hidrogênio verde como substituto do coque de carvão nos altos-fornos, utilizando-o para reduzir o uso do minério de ferro. Neste processo, em vez de emitir CO₂, produz-se água, o que torna a produção mais limpa (Roberto, 2021). Substituir parte dos redutores tradicionais por hidrogênio pode reduzir as emissões globais de CO₂ consideravelmente, além de ajudar na diminuição da utilização de combustíveis fósseis. (Ledari et al, 2023).

Outra usabilidade para o hidrogênio verde é em motores de combustão interna e em células a combustível. Nos motores de combustão interna, a energia é gerada pela combustão do hidrogênio, enquanto nas células a combustível, o hidrogênio gera eletricidade por meio de reações químicas. Em ambos os casos, o hidrogênio é utilizado como combustível substituindo os combustíveis fósseis, resultando em emissões zero de carbono. Os motores de combustão interna (ICE) são mais eficientes em aplicações que exigem alta carga ou intensidade, enquanto as células a combustível (FC) são mais adequadas para veículos leves ou tarefas menos exigentes. Assim, a escolha entre ICE e FC depende da aplicação, da capacidade de armazenamento de combustível e da disponibilidade de hidrogênio purificado, podendo ambos os sistemas se complementarem para obter uma melhor eficiência (Wang et al., 2020).

O principal desafio a ser superado para a adoção do hidrogênio como fonte de energia é o elevado custo de sua produção, o que dificulta uma implementação mais veloz dessa tecnologia. Esse custo elevado abrange todas as fases desde a produção até o armazenamento e distribuição. A redução desses custos é crucial para tornar o hidrogênio competitivo com outras fontes de energia (Zun e Mclellan, 2023).

Segundo Clean Energy Latin America (CELA, 2024), o custo de produção de um quilo de hidrogênio verde no Brasil varia entre US\$ 2,87 e US\$ 3,56, não incluso no valor o investimento realizado para produzir, enquanto o hidrogênio cinza custa cerca de US\$ 2,93. Esses valores evidenciam a necessidade de mudanças para viabilizar processos para tornar o hidrogênio verde economicamente atraente ao mercado. A Empresa de Pesquisa Energética (Epe, 2022) projeta que, até 2050, o custo para produzir hidrogênio verde diminuirá consideravelmente, ficando entre US\$ 2,00 e US\$ 2,50 por quilo.

A criação de políticas e regulamentações é fundamental para o avanço da utilização do hidrogênio como fonte de energia, mas para que isso ocorra serão necessários incentivos, além de normas claras para sua integração na rede elétrica. No Brasil já existem discussões sobre regulamentações: em 2020, o Ministério de Minas e Energia (MME) apresentou o Plano Nacional de Energia 2050, destacando o hidrogênio como uma fonte com grande potencial para utilização em um futuro próximo, com recomendações para aprimorar as normas relacionadas ao tema. (Oliveira, 2022).

Uma das estratégias brasileiras é investir em projetos de pesquisa, desenvolvimento e inovação. A Resolução nº 2 de 2021 do Conselho de Política Energética priorizou o hidrogênio entre os temas de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação (PD&I) (Ministério de Minas e Energia, 2021). Em 2021, o MME também lançou o Programa Nacional do Hidrogênio (PNH₂), que define os principais eixos para o setor, como o fortalecimento da base científica-tecnológica, capacitação, planejamento energético, melhoria do controle de gastos, regulamentação e difusão da abertura para o mercado para aumentar a competitividade.

O Plano Trienal 2023-2025 (PNH₂), apresentado em 2022, possui metas como: implementar plantas pilotos, tornar o Brasil o país mais competitivo na produção de hidrogênio de baixo carbono até 2030, e

consolidar centros produtores de hidrogênio até 2035. Uma tarifa equilibrada também é um ponto importante a ser estudado, especialmente para grandes consumidores. No caso das usinas hidrelétricas reversíveis, já se conseguiu a paridade tarifária, mas para consumidores menores, o uso de armazenadores como vetores de energia ainda não é competitivo sem incentivos.

O Plano Nacional de Energia 2050 identifica que formas de armazenamento com alta flexibilidade operacional, como usinas hidrelétricas reversíveis e baterias, são as mais eficazes para a distribuição de energia elétrica. O hidrogênio verde precisa ser competitivo com outras fontes de energia, considerando custos e eficiência, para se tornar uma opção viável e atraente no mercado, e para isso o desenvolvimento de novas pesquisas é crucial para aprimoramento da produção, armazenamento e uso do hidrogênio verde, visando aumentar a eficiência e reduzir os custos. Colaborações entre universidades e empresas privadas têm sido de extrema importância (Oliveira, 2022). Enfim, existem diversas barreiras e desafios que necessitam de um avanço mais concreto para seguir avançando na implementação dessas tecnologias.

As perspectivas do hidrogênio verde no Brasil revelam um cenário promissor, porém ainda em construção. O país apresenta vantagens comparativas significativas, como uma matriz energética majoritariamente renovável, além da abundância de recursos naturais, o que lhe confere alto potencial para a produção de hidrogênio de baixo carbono. Tais características posicionam o Brasil como uma figura estratégica no emergente mercado global de hidrogênio verde.

Nos últimos anos, observa-se o avanço de iniciativas públicas e privadas voltadas à consolidação da cadeia produtiva do hidrogênio verde no Brasil. Projetos-piloto instalados em estados como Ceará, Bahia e Pernambuco, além de documentos firmados com empresas estrangeiras, demonstram o crescente interesse internacional na estruturação do mercado de exportação. O lançamento do Programa Nacional do Hidrogênio (PNH₂) revela o esforço inicial do governo federal para estabelecer diretrizes que alavanquem o desenvolvimento do setor.

Com a propagação do uso do hidrogênio, espera-se uma gradual diminuição nos custos de produção, facilitando sua adoção em escala global. Embora o Brasil ainda esteja em uma fase inicial de regulamentação para o hidrogênio de baixo carbono, a Lei 14.948, de 2024, que regulamenta a produção de hidrogênio considerado de baixa emissão de carbono e institui uma certificação voluntária, além de incentivos tributários ao setor, representa um avanço importante. Por fim, com seu vasto potencial natural, o Brasil apossou uma oportunidade relevante de se consolidar como líder na produção e na exportação de hidrogênio de baixo carbono e deve continuar avançando nesse caminho promissor.

Dessa forma, apesar do cenário favorável, a consolidação do hidrogênio verde como vetor energético estratégico no Brasil depende de ações coordenadas entre Estado, setor privado e sociedade científica. A superação dos desafios existentes exige planejamento de longo prazo, políticas públicas eficazes, incentivos à inovação e integração com o mercado internacional, visando a transição energética global.

4. Conclusão

Por meio desta revisão da literatura e avaliação do panorama atual, percebe-se a necessidade urgente de pesquisa e investimento em fontes de energias limpas e renováveis, como a gerada através do hidrogênio verde, que se tornará um dos pilares na produção de energia e combustível em futuro próximo. Dito isto, o Brasil terá papel de destaque na produção e exportação dessa matéria prima, devido à sua grande potencialidade de produzir energia limpa de maneira renovável.

Outra vantagem é a existência de uma frota de automóveis que pode ser adaptada para realizar o transporte de maneira segura, contribuindo assim para criação e distribuição de combustíveis produzidos de forma totalmente limpa, mas ainda é necessário explorar novos modos de se armazenar o hidrogênio de maneira segura. Para que haja avanços significativos será necessária uma abordagem colaborativa, envolvendo governos, empresas e a sociedade em geral. Além disso, serão necessários investimentos em pesquisa e desenvolvimento, parcerias estratégicas que serão fundamentais para superar essas barreiras de produção,

legalização e adoção do hidrogênio verde.

Entretanto, a consolidação dessa cadeia produtiva ainda depende da superação de entraves significativos, como a ausência de um marco regulatório específico, os altos custos tecnológicos e a limitação de infraestrutura. Soma-se a isso a necessidade urgente de capacitação técnica e de fortalecimento da pesquisa científica voltada à inovação no setor.

Portanto, para que o hidrogênio verde cumpra seu papel como vetor de desenvolvimento sustentável no Brasil, é indispensável a implementação de políticas públicas, estrutura e articulação entre os envolvidos e o comprometimento com uma agenda de longo prazo. Com ações coordenadas, o país poderá não apenas atender às suas demandas energéticas internas de forma limpa, mas também se tornar um fornecedor global relevante de energia sustentável.

5. Referências

Abad, A. V., & Dodds, P. E. (2020). **Green hydrogen characterisation initiatives: Definitions, standards, guarantees of origin, and challenges.** *Energy Policy*, 138. 111300. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.111300>.

Andersson, J. and Grönkvist, S. (2019). **Large-scale storage of hydrogen.** In *International Journal of Hydrogen Energy* (Vol. 44, Issue 23). <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.03.063>.

Banu, A., Midilli, A., & Bicer, Y. (2023). **Exergetic sustainability comparison of turquoise hydrogen conversion to low-carbon fuels.** *Journal of Cleaner Production*. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135473>.

BEZERRA, Francisco Diniz. **Hidrogênio verde: nasce um gigante no setor de energia.** Caderno Setorial ETENE. Ano 6, nº 212, 2021. Disponível em: <https://bnb.gov.br/s482-dspace/handle/123456789/1109>. Acesso em: 9 out. 2023. Hidrogênio verde" no Brasil em 2021

Cardella, U., Decker, L. and Klein, H. (2017). **Roadmap to economically viable hydrogen liquefaction.** *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(19). <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.01.068>.

Carmo, M., Fritz, D. L., Mergel, J., & Stolten, D. (2013). **A comprehensive review on PEM water electrolysis.** *International journal of hydrogen energy*, 38(12), 4901- 4934.

CELA. (2024). **Custo Nivelado de Hidrogênio Verde no Brasil.** Disponível em: Acesso: 4 de abril de 24.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética (2022). **Hidrogênio Cinza: Produção a partir da reforma a vapor do gás natural.** Nota técnica 01/2022. 2022.

Glenk, G., & Reichelstein, S. (2019). **Economics of converting renewable power to hydrogen.** *Nature Energy*, 4(3), 216-222.

International Energy Agency (IEA). (2021). **The Future of Hydrogen.** Paris: IEA Publications.

International Renewable Energy Agency (IRENA). (2022). **Global Hydrogen Supply Chain Report.** Abu Dhabi: IRENA

International Renewable Energy Agency (IRENA). (2021). **Green Hydrogen: A Guide to Policy Making**. Abu Dhabi: IRENA.

Incer-Valverde, J., Korayem, A., Tsatsaronis, G., Morosuk, T. (2023). “Colors” of hydrogen: Definitions and carbon intensity. **Energy Conversion and Management**, 291, 117294. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.117294>.

Kumar, S. S., & Lim, H. (2022). **An overview of water electrolysis technologies for green hydrogen production**. **Energy Reports**, 8, 13793-13813.

Ledari, M.B., Khajepour, H., Akbarnavasi, H., Edalati, S. **Greening steel industry by hydrogen: Lessons learned for the developing world**. **International Journal of Hydrogen Energy**. 48. 94. 2023.36623-36649. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.06.058>.

Mao, X., Ying, R., Yuan, Y., Li, F. and Shen, B. (2021). **Simulation and analysis of hydrogen leakage and explosion behaviors in various compartments on a hydrogen fuel cell ship**. **International Journal of Hydrogen Energy**, 46(9). <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.11.158>

Ministério de Minas e Energia. (2021) **Bases para a consolidação da Estratégia brasileira do hidrogênio**.

Mouli-Castillo, J., Orr, G., Thomas, J., Hardy, N., Crowther, M., Haszeldine, R. S., Wheeldon, M. and McIntosh, A. (2021). **A comparative study of odorants for gas escape detection of natural gas and hydrogen**. **International Journal of Hydrogen Energy**, 46(27). <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.01.211>.

M. T. Zun and B. C. McLellan. (2023). **Cost Projection of Global Green Hydrogen Production Scenarios**. **Hydrogen**, 932-960.

Oliveira, R. C. de. (2022). TD 2787 - **Panorama do hidrogênio no Brasil**. **Texto Para Discussão**, 1–59. <https://doi.org/10.38116/td2787>.

Panah, P. G., Bornapour, M., Cui, X., & Guerrero, J. M. (2022). **Investment opportunities: Hydrogen production or BTC mining?** **International Journal of Hydrogen Energy**, 47(9)5733-5744. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.11.206>.

Prachi R., P., Mahesh M., W. and Aneesh C., G. (2016). **A Review on Solid State Hydrogen Storage Material**. **Advances in Energy and Power**, 4(2). <https://doi.org/10.13189/aep.2016.040202>

Pruvost, F., Cloete, S., del Pozo, C. A., & Zaabout, A. (2022). **Blue, green, and turquoise pathways for minimizing hydrogen production costs from steam methane reforming with CO2 capture**. **Energy Conversion and Management**, 274, 116458.

Roberto, Paulo. Boletim Legislativo nº90, de Maio de 2021: **perspectivas do Hidrogênio Verde no Brasil em 2021**.

Shirizadeh, B., & Quirion, P. (2023). **Long-term optimization of the hydrogen-electricity nexus in France: Green, blue, or pink hydrogen?** **Energy Policy**, <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2023.113702>.

Wang, Y., Ruiz Diaz, D. F., Chen, K. S., Wang, Z. and Adroher, X. C. (2020). **Materials, technological status, and fundamentals of PEM fuel cells – A review.** In *Materials Today* (Vol. 32). <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2019.06.005>

Zhang, Y., Lin, Y., & Lin, Z. (2020). **Hydrogen storage technologies for renewable energy: A review.** *Journal of Power Sources*, 451(1), 227-239

Zheng, Z. (2021). **Global development trends of green hydrogen production in recent ten years.** *Science Focus*, 16(1), 96-108. <https://doi.org/10.15978/j.cnki.1673-5668.202101007>

Zuben, T. W. V. et al (2022). **Is Hydrogen indispensable for a sustainable world? a review of H₂ applications and perspectives for the next years.** *Journal of the Brazilian Chemical Society*, 33, 824-843.