

HIDROGÊNIO VERDE: ASPECTOS TÉCNICOS, APLICAÇÕES E POTENCIALIDADES NO CENÁRIO ENERGÉTICO ATUAL

1 INTRODUÇÃO

Em 2022, a capacidade de geração de eletricidade a partir de fontes renováveis aumentou em aproximadamente 340 GW, impulsionada por políticas como a iniciativa REPowerEU na União Europeia, a Lei de Redução da Inflação (IRA) nos Estados Unidos e o 14º Plano Quinquenal de Energias Renováveis da China, que devem acelerar a implementação de energia renovável nos próximos anos (IEA, 2023). Nesse cenário, o hidrogênio verde (H₂V) destaca-se como uma alternativa promissora, oferecendo uma fonte de energia limpa e renovável crucial para a transição para uma economia de baixo carbono, sem emissões de CO₂ e com vastas aplicações em setores como transporte e geração de energia (MOHAMED; MANSOUR, 2023; SARKER et al., 2023; NICOLIN; NICOLIN, 2022).

A produção de hidrogênio (H₂) pode ser realizada a partir de diversas matérias-primas, com métodos classificados em dois grupos principais: produção a partir de fontes fósseis e produção a partir de fontes limpas (TAPIA et al., 2018). O H₂ cinza, produzido a partir de gás natural sem captura de carbono, é atualmente a opção mais utilizada devido ao seu menor custo e maior viabilidade tecnológica, enquanto o H₂V, produzido sem emissões de CO₂, é considerado essencial para a transição energética e mitigação das mudanças climáticas (IEA, 2021).

Métodos inovadores para a produção de H₂, como processos eletroquímicos que utilizam águas residuais e o uso de compostos orgânicos como metanol, têm demonstrado resultados promissores, reduzindo o consumo de energia no processo em comparação com a eletrólise tradicional (SASIKUMAR et al., 2008; CARAVACA et al., 2012). O artigo busca fornecer uma visão abrangente dos aspectos técnicos do H₂V, discutindo suas aplicações potenciais e seu papel na transição energética, destacando a importância de soluções sustentáveis e eficientes para o futuro energético global.

2 ASPECTOS TÉCNICOS DO HIDROGÊNIO

O H₂ é uma substância química que pode existir em estado gasoso, sendo inodoro, insípido, incolor e inflamável, formando água ao se combinar com oxigênio (FIGUEIREDO; CESAR, 2021). Em estado líquido, seu volume é 700 vezes menor que no estado gasoso, sendo necessário resfriá-lo a cerca de -253°C para alcançar essa forma (BARBOSA, 2020). Devido às suas baixas temperaturas de fusão e ebulição, o H₂ é gasoso à temperatura ambiente (ARAÚJO et al., 2021). Apresenta alto poder de combustão, com chama que pode atingir cerca de 2.400°C, superando a combustão do gás natural e da gasolina (ARAÚJO et al., 2021). A energia liberada na combustão do H₂ é 2,5 vezes maior do que a dos hidrocarbonetos, como metano e gasolina (SANTOS; SANTOS, 2005).

2.1 PRODUÇÃO DO HIDROGÊNIO

Os métodos de produção do H₂ podem ser classificados em dois grandes grupos: um que o traz gerado a partir de fontes fósseis, e outro a partir de fontes limpas (TAPIA et al., 2018).

Conforme Amin *et al.* (2022) e Lepage *et al.* (2021), os principais processos produtivos de H₂ permanecem utilizando fontes fósseis, como a reforma a vapor de gás natural (76%) e a gaseificação do carvão mineral (22%), com alta emissão de gases do efeito estufa (GEE).

2.2 TRANSPORTE, MANUSEIO E ARMAZENAMENTO DO HIDROGÊNIO

O desenvolvimento de tecnologias para o armazenamento e transporte de H₂ é crucial para evitar perda de qualidade entre a produção e o uso. Embora existam diversas formas de armazenamento, ainda há desafios quanto à eficiência, segurança e custo no manuseio (HASSAN et al., 2021). O transporte de H₂ pode ocorrer em estado gasoso sob alta pressão (500 ou 700 bar) ou na forma líquida a temperaturas em torno de -253° C, um processo complexo e caro (GERMAN BRAZILIAN ENERGY PARTNERSHIP, 2021). Outra alternativa seria a conversão de H₂ em amônia para transporte marítimo (ZÜTTEL et al., 2008).

No curto e médio prazo, a produção de H₂ perto do local de uso ou em curtas distâncias é a opção mais competitiva. Para distâncias maiores, o transporte marítimo é mais adequado. A longo prazo, a construção de redes de dutos para distribuição local pode ser a melhor solução, devido a custos mais atrativos e à capacidade de atender à demanda prevista (OLIVEIRA, 2022).

É importante destacar que os benefícios ambientais do H₂V podem ser comprometidos se seu transporte não for realizado de maneira limpa. Além disso, o armazenamento de H₂ requer infraestrutura complexa, como tanques e bombas, devido ao seu alto potencial inflamável, leveza e facilidade de dispersão (WRI BRASIL, 2021).

Algumas alternativas para o transporte e uso do H₂V incluem injeção direta em linhas de gás natural, armazenamento próximo ao local de produção, ou conversão em metano, que pode ser injetado novamente nos gasodutos (SCHIEBAHN et al., 2015). Medidas de segurança, como a escolha precisa dos materiais de tubulação, são essenciais devido à capacidade do H₂ de penetrar em componentes sólidos; o uso de aço inoxidável, por exemplo, pode prevenir acidentes graves (ZÜTTEL et al., 2008; SILVEIRA, 2017).

Uma estratégia de transição envolve a mistura de H₂ com gás natural usando a infraestrutura existente, mas a escalabilidade do H₂V depende de pesquisas sobre os materiais usados nas linhas de transmissão de gás natural (ERIN; LOTT; SMITH, 2021; MARBAN; VALDÉS-SOLÍS, 2007). A compreensão detalhada da operação mecânica e da microestrutura dos aços utilizados é crucial para a segurança e integridade do processo, sendo de grande importância para as empresas envolvidas (WANG et al., 2022).

À medida que a produção de H₂ cresce, os desafios de armazenamento e transporte aumentam proporcionalmente. Embora parte da infraestrutura de transmissão de gás natural possa operar com H₂V em grandes volumes, alguns gasodutos têm limitações, e a variabilidade nas misturas entre países pode complicar o transporte internacional (MELAINA et al., 2013; IRENA, 2020).

3 APLICAÇÕES E USOS DO HIDROGÊNIO

O H₂ tem aplicações em diversas cadeias industriais, sendo usado principalmente no refino de petróleo (33%), na produção de amônia (27%), metanol (11%) e aço (3%) através da redução direta de minério de ferro (IEA, 2019). Além disso, o H₂ é utilizado no processamento de alimentos e no setor de transportes (CAPURSO et al., 2022; ZUBEN et al., 2022). Há também a possibilidade de usá-lo como vetor para armazenar energia elétrica de fontes renováveis, como eólica e solar, proporcionando maior flexibilidade ao sistema energético e servindo como um elo entre a geração de energia elétrica e sua aplicação industrial (ABDIN et al., 2020).

No setor de transporte, veículos podem ser alimentados por H₂ de três maneiras: (i) combustão direta do H₂ em um motor, (ii) uso de células a combustível para gerar eletricidade e alimentar motores elétricos, e (iii) conversão do H₂ em combustíveis sintéticos ou e-combustíveis para motores de combustão. As duas primeiras opções exigem tanques capazes de armazenar H₂ de forma compacta, segura e econômica, suportando altas pressões e com vedação impecável. A indústria de maquinário tem a oportunidade de melhorar e reduzir os

custos de produção dos tanques e das fibras de carbono utilizadas em sua fabricação (H2 BRASIL, 2022).

As aplicações do H₂ podem ser segmentadas em dois grupos principais: energético e não energético. No uso energético, ele é empregado nos setores de transporte (motores a combustão, células a combustível, combustíveis sintéticos), geração de energia, e em equipamentos portáteis como celulares e notebooks. No uso não energético, o H₂ é utilizado em ambientes residenciais (aquecimento e refrigeração), na indústria química, em refinarias e na siderurgia (HYDROGEN COUNCIL, 2020).

O H₂V pode ser empregado na produção de energia elétrica através de tecnologias como turbinas a gás operadas a H₂ e células a combustível estacionárias em grande escala, complementando outras fontes renováveis de eletricidade e substituindo combustíveis fósseis. Além disso, o H₂V pode ser armazenado para garantir a confiabilidade e flexibilidade de sistemas de energia que dependem de fontes renováveis de geração variável, equilibrando a oferta e demanda de eletricidade (H2 BRASIL, 2022).

4 VANTAGENS DO HIDROGÊNIO VERDE

O H₂, quando convertido em célula a combustível, pode atingir uma eficiência energética de até 90%, superando a de qualquer motor convencional. Isso se deve à sua baixa energia de combustão, temperatura de autoignição e inflamabilidade (STAMBOULI, 2011). No Brasil, a produção de H₂V pode se tornar menos onerosa aproveitando o potencial da rede elétrica existente, já que 70% dos custos de produção estão relacionados à energia utilizada no processo (HYDROGEN COUNCIL, 2020). Com a energia eólica e solar sendo as principais fontes para a produção de H₂V, o país pode ter uma vantagem competitiva se explorar sua rede interna de energia elétrica (GERMAN-BRAZILIAN ENERGY PARTNERSHIP, 2021).

Uma das maiores vantagens do uso do H₂ é o benefício ambiental, pois sua utilização não gera poluentes e contribui para a redução das emissões de GEE (SILVEIRA, 2017). Além disso, se as previsões de redução dos custos de produção do H₂V se confirmarem, ele poderá se tornar competitivo e menos sujeito às variações de preço do mercado em comparação com outros combustíveis (JANSSEN et al., 2022). Assim, o H₂ é visto como uma opção de baixo impacto ambiental e um substituto competitivo para combustíveis poluentes em veículos (CGEE, 2010).

5 CONCLUSÃO

O H₂V é uma solução promissora e essencial para enfrentar os desafios globais de energia e mudanças climáticas, oferecendo uma alternativa limpa e renovável aos combustíveis fósseis, com capacidade de reduzir significativamente as emissões de GEE. Embora a produção de H₂ a partir de fontes renováveis, como a eletrólise da água, ainda enfrente desafios relacionados ao custo e à eficiência, avanços tecnológicos e políticas de incentivo devem tornar o H₂V mais competitivo no mercado energético global. Políticas como a iniciativa REPowerEU, a Lei de Redução da Inflação nos EUA e o 14º Plano Quinquenal de Energias Renováveis da China são exemplos de esforços importantes nessa direção.

A infraestrutura necessária para o transporte e armazenamento de H₂V ainda precisa ser significativamente desenvolvida para garantir segurança e viabilidade econômica. Investimentos em pesquisa e desenvolvimento são fundamentais para superar os desafios técnicos associados ao manuseio e à distribuição desse elemento.

As aplicações do H₂V são amplas, abrangendo desde a geração de energia elétrica e o setor de transporte até indústrias como a de aço e fertilizantes. Sua versatilidade como vetor

energético e capacidade de integração com outras fontes renováveis o posicionam como central na construção de um sistema energético mais resiliente e sustentável.

Concluindo, o H₂V oferece um caminho viável para uma transição energética sustentável, mas seu sucesso dependerá da colaboração entre governos, indústrias e comunidades científicas. Avanços tecnológicos, políticas públicas favoráveis e investimentos em infraestrutura são cruciais para que o H₂V se torne um pilar da economia de baixo carbono do futuro. O compromisso global com a descarbonização e a adoção de fontes de energia limpa são essenciais para garantir um planeta mais sustentável e habitável para as futuras gerações.

REFERÊNCIAS

ABDIN, Zainul et al. Hidrogênio como vetor de energia. **Renewable and sustainable energy reviews** , v. 120, p. 109620, 2020.

AMIN, Muhammad et al. Produção de hidrogênio por meio de processos de energia renovável e não renovável e seu impacto nas mudanças climáticas. **International journal of hydrogen energy** , v. 47, n. 77, p. 33112-33134, 2022.

ARAÚJO, Maria Fernanda Borges et al. HIDROGÊNIO: COMBUSTÍVEL DO FUTURO?. **Caderno de Graduação-Ciências Exatas e Tecnológicas-UNIT-SERGIPE**, v. 7, n. 1, p. 60-69, 2021.

BARBOSA, H. A. Processos de produção e estocagem de hidrogênio: uma revisão da literatura. 2020. 81 p. Monografia (Engenharia Química) — Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN, 2020.

CARAVACA, A. et al. Reforma eletroquímica de soluções de etanol-água para produção de H₂ puro em uma célula de eletrólise PEM. **International Journal of Hydrogen Energy** , v. 37, n. 12, p. 9504-9513, 2012.

CAPURSO, T. et al. Perspectiva do papel do hidrogênio na transição energética do século XXI. **Conversão e Gestão de Energia** , v. 251, p. 114898, 2022.

CGEE - CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS. Hidrogênio energético no Brasil: subsídios para políticas de competitividade, 2010-2025. Brasília: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE), 2010. Disponível em: <https://www.cgee.org.br/documents/10195/734063/Hidrogenio_energetico_completo_22102010_9561.pdf/367532ec-43ca-4b4f-8162-acf8e5ad25dc?version=1.5>. Acesso em: 21 mai. 2023.

ERIN, B. M.; LOTT, M. C.; SMITH, K. N. Investing in the US natural gas pipeline system to support net-zero targets. Estados Unidos: Columbia University, 2021. Disponível em: <https://www.energypolicy.columbia.edu/sites/default/files/fileuploads/GasPipelines_CGEP_Report_042221.pdf>. Acesso em: 19 jun. 2023.

FIGUEIREDO, B. B.; CESAR, F. I. G. Hidrogênio como fonte alternativa de combustível automotivo: uma pesquisa bibliográfica exploratória. *Revista Científica Acerte*, [s. l.], v. 1, n. 6, p. 1– 19, 2021.

GERMAN-BRAZILIAN ENERGY PARTNERSHIP. Mapeamento do setor de hidrogênio brasileiro. Brasília: GmbH, 2021. Disponível em: <https://www.energypartnership.com.br/fileadmin/user_upload/brazil/media_elements/Mapeamento_H2_-Diagramado-_V2h.pdf>. Acesso em: 28 jan. 2023.

HASSAN, IA et al. Tecnologias de armazenamento de hidrogênio para aplicações estacionárias e móveis: Revisão, análise e perspectivas. **Renewable and Sustainable Energy Reviews** , v. 149, p. 111311, 2021.

HYDROGEN COUNCIL. Path to hydrogen competitiveness. A cost perspective. Hydrogen Council, 2020. Disponível em: <<https://hydrogencouncil.com/en/path-to-hydrogen-competitiveness-a-cost-perspective>>. Acesso em: 01 fev. 2023.

H2 BRASIL. Expansão do Hidrogênio Verde . Avaliação do potencial da indústria brasileira para o desenvolvimento da cadeia de valor do Hidrogênio Verde com foco no Estado do Ceará. Relatório 1 - Cadeia de Valor do Hidrogênio Verde. 2022. Disponível em: <https://www.h2verdebrasil.com.br/estudos-e-artigos/>. Acesso em: 18 Fev. 2024.

IEA - International Energy Agency. The Future of Hydrogen - Seizing today's opportunities. 203 p. 2019.

IEA - INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. World energy outlook. França: IEA Publications, 2021. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook2021>>. Acesso em: 19 jun. 2023.

IEA - INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Global Hydrogen Review 2023. França: IEA Publications, 2023. Disponível em: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/8d434960-a85c-4c02-ad96-77794aaa175d/GlobalHydrogenReview2023.pdf>. Acesso em: 19 Fev. 2024.

IRENA – INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY. Green hydrogen. A guide to policy making. Abu Dhabi: IRENA, 2020. Disponível em: <<https://irena.org/publications/2020/Nov/Green-hydrogen>>. Acesso em: 19 jun. 2023.

JANSSEN, Jacob LLCC et al. Projeções de custos específicas de cada país para produção de hidrogênio renovável por meio de sistemas de eletricidade off-grid. **Applied Energy** , v. 309, p. 118398, 2022.

LEPAGE, Thibaut et al. Biomassa para hidrogênio: Uma revisão das principais rotas de produção, avaliação de processos e avaliação técnico-econômica. **Biomassa e Bioenergia** , v. 144, p. 105920, 2021.

MELAINA, Marc W.; ANTONIA, Olga; PENEV, Michael. Misturando hidrogênio em redes de gasodutos de gás natural: uma revisão de questões-chave. 2013.

MOHAMED ELSHAFEI , A.; MANSOUR , R. Green Hydrogen as a Potential Solution for Reducing Carbon Emissions: A Review. *Journal of Energy Research and Reviews* , [S. l.] , v. 13, n. 2, p. 1–10, 2023. DOI: 10.9734/jenrr/2023/v13i2257. Disponível em: <https://journaljenrr.com/index.php/JENRR/article/view/257>. Acesso em: 13 ago. 2024.

NICOLIN, Bogdan Adrian; NICOLIN, Ilie. Green hydrogen as an environmentally-friendly power source. *INCAS Bulletin*, v. 15, n. 2, p. 141-147, 2023.

OLIVEIRA, R. C. Panorâma do hidrogênio do Brasil. Texto para discussão. Brasília: IPEA, 2022.

SANTOS, F.M., SANTOS, F.A. O combustível “hidrogênio”. *Rev. Educ., Ciênc. Tecnol.*, n.31, 2005.

SARKER, Asim Kumar et al. Perspectiva de geração de hidrogênio verde a partir de fontes de energia renováveis híbridas: Uma revisão. *Energies*, v. 16, n. 3, p. 1556, 2023.

SASIKUMAR, Gangadharan et al. Eletrólise aquosa de metanol usando membrana condutora de prótons para produção de hidrogênio. *International journal of hydrogen energy*, v. 33, n. 21, p. 5905-5910, 2008.

SCHIEBAHN, Sebastian et al. Power to gas: Visão geral tecnológica, análise de sistemas e avaliação econômica para um estudo de caso na Alemanha. *International journal of hydrogen energy*, v. 40, n. 12, p. 4285-4294, 2015.

SILVEIRA, J. L. Sustainable hydrogen production processes. *Energy, Economic and Ecological Issues*, [s. l.], 1º ed. São Paulo: Springer, 2017.

STAMBOULI, A. B. Fuel cells: The expectations for an environmentalfriendly and sustainable source of energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, [s. l.], v. 15, p. 4507–4520, 2011.

TAPIA, John Frederick D. et al. Uma revisão de modelos de otimização e tomada de decisão para o planejamento de sistemas de captura, utilização e armazenamento de CO₂ (CCUS). *Produção e Consumo Sustentáveis*, v. 13, p. 1-15, 2018.

WANG, Hantong et al. Pesquisa e demonstração sobre compatibilidade de hidrogênio de oleodutos: uma revisão do status atual e desafios. *International journal of hydrogen energy*, v. 47, n. 66, p. 28585-28604, 2022.

WRI BRASIL. Ônibus a hidrogênio pode complementar veículos a bateria em transição para transporte limpo. Heloant Sousa, Guilherme Petzhold e Cristina Albuquerque. 2021. Disponível em: <<https://wribrasil.org.br/pt/blog/cidades/onibus-hidrogenio-podecomplementar-veiculos-bateria-em-transicao-para-transporte-limpo>>. Acesso em: 08 jun. 2023.

ZUBEN, Theodora W. Von et al. O hidrogênio é indispensável para um mundo sustentável? Uma revisão das aplicações do H₂ e perspectivas para os próximos anos. *Revista da Sociedade Brasileira de Química*, v. 33, p. 824-843, 2022.

ZÜTTEL, A.; BORGSCHULTE, A.; SCHLAPBACH, L. Hydrogen as a future energy carrier. 1º ed. Alemanha: Wiley-Vch, v. 1, 2008.