O uso do hidrogênio verde como vetor de energia elétrica e seus principais desafios no Brasil

Caison R. Ramos *. Igor Luiz. D. Forno *. Adailton B. Junior *. Gustavo Marchesan* Ghendy Cardoso Jr*. Welisson L. A. Costa **. Rodrigo B. Gadelha. Vitor S. Batista**. André P. Leão **. João Paulo A. Vieira****

**Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, Brasil*
(e-mails: caison.ramos@acad.ufsm.br, igorluiz.015@gmail.com, adailtonjn68@gmail.com, marchesan.gustavo@ufsm,ghendy@ufsm.br).
***Universidade Federal do Pará, Belém, PA, Brasil*
(e-mails: welisson.eng.eletrica@gmail.com, rodrigogadelha22@gmail.com, vitordsbatista@gmail.com, leaoap2017@gmail.com, jpavieira@ufpa.br)

Abstract: The production of green hydrogen is being considered as an energy solution by various countries around the world. Governments are setting targets and allocating resources to promote this type of fuel. Although Brazil is in the early stages of infrastructure and public policies related to hydrogen, it has the potential to become a leader in this production sector. However, it must overcome some challenges such as the initial implementation cost, advancements in technology efficiency, and availability of raw materials. Therefore, the article aims to address the main topics of using green hydrogen as an electricity vector. To achieve this goal, a literature review is conducted on the main themes related to obtaining, storing, technologies, and challenges encountered in Brazil regarding the implementation of hydrogen. Literature analysis suggests that using renewable sources for fuel production is still a costly process, leading most countries to produce hydrogen from fossil fuels, releasing carbon dioxide into the atmosphere.

Resumo:

A produção de hidrogênio de verde é tratada como solução energética para diversos países pelo mundo. Governos estão criando metas e aportando recursos com a finalidade de alavancar esse tipo de combustível. Apesar do Brasil estar nas etapas iniciais de infraestrutura e políticas públicas referentes ao hidrogênio, possuí o potencial para se torar líder nesse ramo de produção. Contudo para se tornar referência na produção de hidrogênio, os brasileiros devem superar alguns desafios como o custo inicial de implementação, avanço de eficiência nas tecnologias e disponibilidade de matéria prima. O objetivo deste artigo é apresentar os principais desafios do uso do hidrogênio verde como vetor de energia elétrica. É realizada uma revisão bibliográfica sobre a classificação de cores e desafios encontrados no Brasil em relação a implementação de hidrogênio. A análise da literatura sugere que o uso das fontes renováveis para produção deste combustível é ainda um processo caro, fazendo com que a maior parte dos países produzam hidrogênio a partir de combustíveis fósseis, liberando dióxido de carbono na atmosfera.

Keywords: Hydrogen; energy vector; innovation, technology, incentive policies.

Palavras-chaves: Hidrogênio; vetor de energia; inovação; tecnologia; políticas de incentivos.

1. INTRODUÇÃO

O hidrogênio é o elemento químico mais abundante no universo, no entanto, em sua forma pura raramente é encontrado na natureza. Normalmente está associado a outros elementos químicos como em moléculas de água (H_2O), em plantas e hidrocarbonetos (Schlapbach et al. 2001). A descoberta desse elemento remonta a 1766, creditada a Henry Cavendish, que, ao expor ácido ao ferro, observou bolhas que, ao entrar em contato com o ar, causavam explosões. A nomenclatura "hidrogênio," significa "formação de água" em grego, e foi cunhada por Lavoisier (Karaca et al. 2021).

A cadeia de utilização do hidrogênio envolve diversas etapas, começando pela sua obtenção. A produção de hidrogênio puro (H_2) ocorre por meio de processos industriais específicos, tais como eletrólise, reforma de metano, nafta ou vapores de hidrocarboneto, além de outras abordagens como a oxidação parcial de carvão ou óleos pesados (Hermesmann et al. 2022).

Após a obtenção do hidrogênio, é necessário considerar seu armazenamento, que pode ocorrer em diferentes formas: gasosa, líquida ou sólida. O armazenamento sólido implica o uso de hidretos metálicos, a forma líquida combina o hidrogênio com compostos intermediários, como a amônia, enquanto a forma gasosa é realizada em gasômetros, cilindros ou vasos de alta pressão (Andersson et al. 2019).

Para transformar o hidrogênio em eletricidade e utilizá-lo como vetor de energia, a principal via é por meio de células a combustível em transformações eletroquímicas. No entanto, também podem ser empregadas turbinas a hidrogênio que realizam a combustão deste combustível (Öberg et al. 2022) (Isfahani et al. 2016).

Apesar do potencial do hidrogênio como fonte de energia limpa, diversos desafios precisam ser superados, incluindo a baixa eficiência de conversão, questões de segurança no armazenamento e o alto custo de implementação (Rasul et. al. 2022). Paralelamente, o cenário global mostra um aumento significativo nos investimentos em pesquisa e uso de hidrogênio. Em 2019, o mercado internacional movimentou entre U$110 e 136 bilhões, impulsionado por setores como a indústria de amônia, fertilizantes, derivados de petróleo e alimentícia, evidenciando a crescente preocupação com a descarbonização das plantas energéticas (Ministério de Minas e Energia 2021).

Visto o acima exposto, este artigo busca realizar uma revisão bibliográfica sobre obtenção, armazenamento, tecnologias e desafios encontrados no Brasil relacionados ao hidrogênio verde. Esta abordagem se torna importante devido a crescente preocupação com a descarbonização e investimento em hidrogênio de baixo carbono.

O artigo é dividido da seguinte forma: na segunda seção são apresentadas as principais formas de classificação do hidrogênio; na terceira seção são apresentados os principais desafios para a larga utilização do combustível no Brasil, e por fim, na quarta seção são apresentadas as considerações finais.

2. CLASSIFICAÇÃO DO HIDROGÊNIO

O processo de obtenção do hidrogênio pode ser proveniente da utilização de uma fonte limpa, sem liberação de dióxido de carbono (CO_2) ou de fontes fósseis, liberando CO_2 na atmosfera. O uso das fontes limpas para produção de hidrogênio é ainda um processo caro, o que faz com que a maior parte dos países produzam hidrogênio a partir de combustíveis fósseis (Pruvost et al. 2022).

Uma das formas de se classificar o hidrogênio é justamente pela emissão de carbono. Hidrogênio produzido a partir da eletrólise com fontes renováveis, ou com fonte nuclear são denominados de hidrogênio de baixa emissão ou de baixo carbono. Enquanto, hidrogênios obtidos de forma a liberar carbono na natureza são classificados como hidrogênios de alta emissão.

Outra forma, que está amplamente difundida na literatura, é a partir da classificação por cores. Como apresentado no Tabela 1. Nesta classificação o hidrogênio é subdividido conforme a sua obtenção em cores: verde, azul, marrom, cinza, turquesa, vermelho, rosa, laranja e musgo.

O hidrogênio verde é obtido por intermédio da eletrólise da água utilizando fontes renováveis de energia para auxiliar a quebra das moléculas (Kumar et. al. 2022). Durante este processo, as moléculas da água são divididas, gerando oxigênio (O_2) e hidrogênios (H_2). Este processo caracteriza-se como sendo sem emissão direta de dióxido de carbono na atmosfera (Carmo et al. 2013).

O hidrogênio musgo é produzido a partir da biomassa, sua produção pode ser realizada em um processo misto utilizando reforma e gaseificação, pirólise ou biodigestão. A emissão de gás carbônico é considerada baixa e pode se aproveitar de resíduos agrícolas, florestais e urbanos (Ministério de Minas e Energia 2021).

O uso da eletrólise para obtenção do hidrogênio constitui uma ferramenta fundamental para a descarbonização global da matriz elétrica, o que culmina na redução dos gases de efeito estufa. A obtenção de hidrogênio verde demanda considerável uso de eletricidade, que não torna atraente em termos de custo-benefício em certos países devido ao custo de geração de energia e a disponibilidade de matéria prima (Pruvost et al. 2022).

A produção do hidrogênio azul é feita por intermédio da reforma do vapor do gás natural. Neste processo, o gás natural é dividido em H_2 e CO_2 (Pruvost et al. 2022). Cerca de 85% a 95% do dióxido de carbono é capturado e armazenado. No entanto, parcela desse gás não pode ser capturado e é liberado na atmosfera.

Tabela 1. Classificação por cores

Cor	Fonte de eletricidade	Tipo de produção	Emissão de CO_2
Musgo	Biomassa	Reforma/gaseificação e pirólise	Baixa
Preto	Fontes não renováveis	Gaseificação	Alta
Marrom	Fontes não renováveis	Gaseificação	Alta
Turquesa	Fontes não renováveis	Pirólise	Zero emissão direta
Cinza	Fontes não renováveis	Reforma a vapor	Alta
Azul	Fontes não renováveis	Reforma a vapor	Baixa
Rosa	Nuclear	Eletrólise	Baixa
Laranja	Mescla de fontes	Eletrólise	Depende das fontes
Verde	Fontes renováveis	Eletrólise	Zero emissão direta

O hidrogênio marrom é obtido a partir de matéria-prima rica em hidrocarbonetos como o carvão ou metano através do processo de gaseificação. Este processo libera grande quantidade de dióxido de carbono na atmosfera (Arcos et al. 2023).

O hidrogênio cinza é produzido por fontes não renováveis de energia tal como os combustíveis fósseis como o gás natural ou carvão. Neste processo, o CO_2 produzido não é capturado, e é diretamente lançado na atmosfera. (Pruvost et al. 2022). Comumente visto na literatura o hidrogênio turquesa é produzido da pirólise do metano e armazenamento sólidos de CO_2 (Banu et al. 2023).

O hidrogênio laranja é produzido a partir da rede e da eletrólise, a produção de CO_2 é indireta e depende da matriz energética (Incer-Valverde et al. 2023). O hidrogênio rosa é produzido através de energia nuclear e água (Shirizadeh et al. 2023). O hidrogênio preto é produzido a partir do carvão betuminoso, pelo processo de gaseificação e possui alta emissão de CO_2.

3. DESAFIOS DA UTILIZAÇÃO DO HIDROGÊNIO VERDE COMO VETOR DE ENERGIA DO BRASIL

O avanço da preocupação ambiental e conflitos mundiais que afetam o fornecimento de gás natural, tem feito com que, as pesquisas e investimentos em hidrogênio de baixa emissão, se intensifiquem (Kucukvar 2021), (BatteryBits 2022). Logo, há um esforço significativo em curso para facilitar a transição para uma maior utilização do hidrogênio como vetor de energia. Contudo, há empecilhos que ainda dificultam a sua utilização. Entre elas destacam-se: o custo, competição com outras formas de armazenamento, a infraestrutura, a integração com a rede elétrica, políticas e disponibilidade recursos como água.

3.1 Custo

O desafio inegável que se apresenta é o custo elevado associado produção de hidrogênio de um modo geral, o que tem impedido uma adoção mais rápida dessa tecnologia. Esse custo expansivo abrange todos os estágios da cadeia de abastecimento de hidrogênio, desde a produção até o armazenamento e a distribuição. O investimento inicial necessário é considerável, sendo que os equipamentos e materiais utilizados nesse processo, como catalisadores, membranas e eletrodos, também contribuem para a elevação dos custos. Além dos motivos citados, o processo de produção de hidrogênio de baixa emissão é aumentado, principalmente devido ao alto custo da eletricidade renovável exigida para a eletrólise da água. A redução desses custos de produção torna-se crucial para que o hidrogênio de baixo carbono se torne competitivo em comparação com outras fontes de energia (Zun e McLellan 2023).

Conforme estudo conduzido pela Clean Energy Latin America (CELA) em 2023, o custo de produção no Brasil para um quilo de hidrogênio verde situa-se entre U$ 2,87 e U$ 3,56, não considerando o investimento inicial. Já o custo de produção do hidrogênio cinza é de U$ 2,93 (CELA 2024). Esses números destacam a necessidade de esforços contínuos para otimizar os processos e reduzir os custos, promovendo assim a viabilidade econômica do hidrogênio como uma fonte de energia sustentável.

Já segundo a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), conforme a Figura 1, há a tendência de que até 2050, o custo para a produção de hidrogênio diminuirá drasticamente. Dentre as produções, destaca-se a tendência do hidrogênio verde de estar na faixa de U$2,50 a U$2,00 por quilo (EPE 2022).

3.2 Infraestrutura

A necessidade de desenvolver e expandir a infraestrutura para a produção, armazenamento, transporte e distribuição de hidrogênio é crucial para impulsionar a transição para uma matriz energética mais sustentável. Isso engloba a construção de eletrolisadores, instalações de armazenamento avançadas e o estabelecimento de uma rede eficiente de distribuição para levar o hidrogênio aos pontos de consumo.

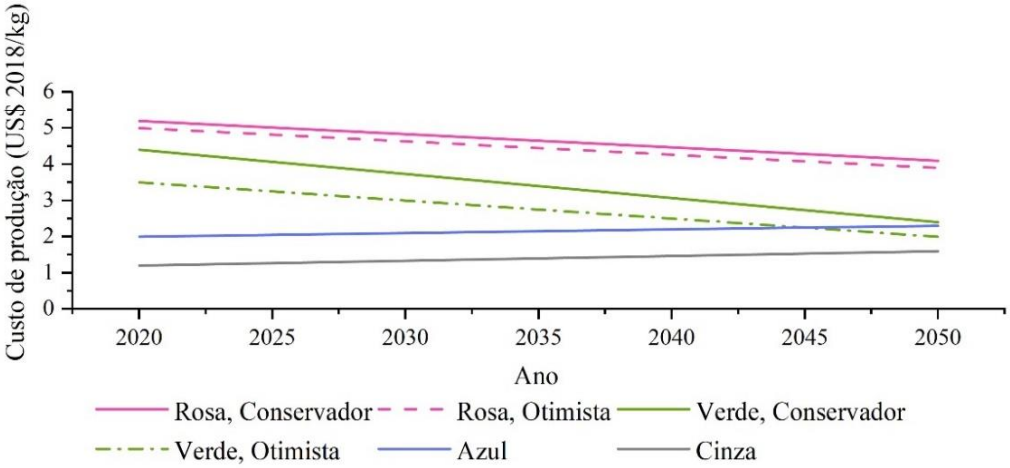

Fig. 1 Projeção da EPE sobre o valor da produção de hidrogênio até 2050 (EPE 2022).

No contexto da produção de hidrogênio de baixa emissão, o Brasil encontra-se em uma fase inicial de implementação de estruturas dedicadas a essa tecnologia. Até o ano de 2021, o país carecia de plantas de geração de hidrogênio verde. Contudo, um marco significativo ocorreu em dezembro de 2021, quando a empresa Eletrobras Furnas inaugurou uma planta de estudos para a produção de hidrogênio verde na Usina Hidrelétrica de Itumbiara. (Ministério de Minas e Energia 2021)

No ano subsequente, em 2022, a White Martins, pertencente ao grupo Linde, deu início à produção de hidrogênio verde em média escala. Outro projeto relevante foi o projeto piloto do Complexo Termelétrico do Pecém, liderado pela EDP Brasil, com a estimativa de atingir uma capacidade de produção de 3MW até 2024 (White Martins, 2022).

Em 2023, o Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro inaugurou uma planta de produção de hidrogênio focada em micro mobilidade, demonstrando a diversificação das aplicações desse combustível limpo (COPPE, 2023).

Apesar do estágio inicial, o número de projetos pilotos tem crescido anualmente, sinalizando um aumento no comprometimento com a expansão da produção desse combustível sustentável. A Unigel, uma empresa do setor de fertilizantes, está contribuindo para esse avanço ao construir uma fábrica de hidrogênio verde em Camaçari, com a expectativa de produzir 10 mil toneladas do combustível anualmente. Esses esforços coletivos prometem impulsionar a adoção e disseminação do hidrogênio verde como uma alternativa viável e ambientalmente amigável (UNIGEL, 2023).

3.3 Políticas e regulamentações

O desenvolvimento de políticas e regulamentações adequadas é crucial. Isso inclui a criação de incentivos fiscais, tarifas favoráveis, padrões de qualidade e segurança, além de regras claras para a integração na rede. Atualmente, no Brasil se está discutindo regulamentações e normas para este combustível. Em 2020, o Ministério de Minas e Energia apresentou o Plano Nacional de Energia 2050, entre as fontes consideradas disruptivas há destaque para o hidrogênio. O plano trás recomendações para aprimorar regulamentos relacionados ao combustível (Oliveira 2022).

Uma das estratégias do Brasil é a produção de projetos de pesquisa, desenvolvimento e inovação na área do hidrogênio. A Resolução nº 2 de 10 de fevereiro de 2021 do Conselho de Política Energética, estabeleceu orientações para Projetos de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação (PD&I), priorizando entre outros temas o hidrogênio (Ministério de Minas e Energia 2021).

Também em 2021, o MME lançou o Programa Nacional do Hidrogênio (PNH2) que apresenta os principais tópicos e eixos para a área (Ministério de Minas e Energia 2021). Este documento indica os caminhos que a política nacional deve seguir:

- Fortalecimento das bases científico-tecnológicas;
- Capacitação de recursos humanos;
- Planejamento Energético;
- Arcabouço legal e regulatório-normativo;
- Abertura do mercado e competividade;

Em 2022, foram apresentadas as metas do Plano Trienal 2023-2025 do PNH2. Dentre as metas incluídas destacam-se:

- Disseminar plantas pilotos;
- Consolidar o Brasil como o país mais competitivo do mundo na produção de hidrogênio de baixo carbono até 2030;
- Consolidar hubs de hidrogênio de baixo carbono até 2035.

Além dos objetivos estabelecidos, destaca-se como uma prioridade crucial a necessidade de criar um marco legal para o setor de hidrogênio. O Ministério de Minas e Energia (MME) está trabalhando na implementação do projeto de lei nº 2308/2023, que propõe a instituição desse marco. Este projeto não apenas estabelece diretrizes legais, mas também oferece incentivos à indústria de hidrogênio de baixa emissão, dando origem ao Programa de Desenvolvimento do Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono (PHBC).

Outro ponto relevante a ser considerado é a questão da paridade tarifária. No contexto de grandes consumidores, as usinas hidrelétricas reversíveis praticamente alcançaram a paridade tarifária, representando mais de 99% do armazenamento existente no sistema elétrico de potência (Oliveira 2022). No entanto, para consumidores menores, a utilização de armazenadores como vetores de energia ainda não atingiu esse ponto. A paridade tarifária, neste contexto, significa que o uso desses armazenadores se torna competitivo, ou seja, sua implementação pode ocorrer sem depender de incentivos governamentais.

No cenário brasileiro, o Plano Nacional de Energia 2050 identifica que as formas de armazenamento com impacto efetivo na distribuição de energia elétrica são aquelas com dinâmica rápida e flexibilidade operacional, tais como volantes de inércia, usinas hidrelétricas reversíveis, armazenamento de ar comprimido e baterias, devido à portabilidade, escalabilidade e menor exigência de capital, além do menor risco de tecnologia inicial (Oliveira 2022).

Quanto a tecnologias emergentes, como o hidrogênio, a falta de maturação tecnológica impõe desafios. Apesar de

iniciativas pontuais, mudanças regulatórias serão necessárias para impulsionar sua difusão. No cenário nacional, a ausência de previsão desse tipo de sistema no curto prazo destaca a necessidade de um planejamento estratégico para incorporar efetivamente o hidrogênio nas políticas energéticas do país.

3.4 Desenvolvimento de novas pesquisas

A pesquisa e o desenvolvimento contínuo de tecnologias relacionadas à produção, armazenamento e uso do hidrogênio verde são essenciais para melhorar a eficiência e reduzir os custos ao longo do tempo. Projetos de pesquisa e desenvolvimento que apresentam colaboração entre universidades e empresas privadas vêm sendo desenvolvidos a fim de aprimorar a implementação de tecnologias baseadas em hidrogênio (Oliveira 2022).

Em um desses projetos, a Universidade Federal do Pará em conjunto com a Universidade Federal de Santa Maria e a empresa Norte Energia, estão desenvolvendo a primeira microrrede brasileira fotovoltaica isolada com armazenamento de hidrogênio verde. A MIRAHV, como é denominada a microrrede, possuí como objetivo implementar um sistema com capacidade de atender uma carga de 15 kW por até dois dias sem sol. A proposta será implementada na área da Usina Hidrelétrica de Belo Monte, em Altamira no Pará (Norte Energia, 2024).

3.5 Disponibilidade de Matéria-Prima

A produção sustentável de hidrogênio verde depende criticamente da disponibilidade adequada de água limpa e eletricidade renovável. A gestão responsável e sustentável desses recursos é essencial para garantir a viabilidade ambiental dessa abordagem.

É importante abordar com cuidado o uso da energia elétrica para o armazenamento de hidrogênio, pois, ao contrário de outras fontes de energia primária, a eletricidade precisa ser gerada previamente, não sendo encontrada livremente na natureza. Quando se trata de altas produções de hidrogênio, é imperativo contar com um substancial oferta de energia elétrica, especialmente preferindo períodos de excesso de geração em sistemas renováveis (Oliveira 2022).

Outro requisito crucial para o processo de eletrólise, fundamental na produção de hidrogênio verde, é a disponibilidade de água. Portanto, a região em que a central de produção é estabelecida deve garantir a disponibilidade adequada de água e eletricidade.

Em um estudo anterior (Bajay et al. 2022), os autores enfatizaram a importância da diversificação no uso do armazenamento de energia, adaptando-se às características específicas de cada região. Essa perspectiva alinhada à realidade regional também é corroborada por (ESA 2022).

3.6 Competitividade com Outras Fontes de Energia

O hidrogênio verde precisa competir com outras fontes de energia, tanto em termos de custos quanto de eficiência. Certificar-se de que seja uma opção viável e atraente é fundamental para sua aceitação no mercado.

As principais vantagens destas tecnologias, no atual contexto da transição dos sistemas elétricos é que essas poderão operar como unidades despachadas para amortização de carga em horários de pico, melhoria do fator da potência, suporte da carga em momentos de modo de espera, operar em paralelo com geradores distribuídos, facilitar a integração das micro redes (Kucukvar 2021), (BatteryBits 2022), (Bajay et al. 2022).

4. CONCLUSÃO

A utilização do hidrogênio é, sem dúvida, um elemento crucial na busca pela descarbonização, promovendo melhorias substanciais nos sistemas elétricos de potência. Apesar desses benefícios incontestáveis, depara-se com uma série de desafios que precisam ser superados para impulsionar a evolução das tecnologias baseadas em hidrogênio.

A superação dos desafios demanda uma abordagem holística, envolvendo não apenas governos, mas também empresas, comunidades locais e a sociedade em geral. Incentivos bem elaborados, investimentos robustos em pesquisa e desenvolvimento, além de parcerias estratégicas, desempenham papel fundamental na transposição dessas barreiras e no eficaz impulsionamento da implementação de microgerações com hidrogênio verde no Brasil.

A expectativa é que, à medida que a utilização do hidrogênio se expanda gradualmente, os custos de implementação diminuam, facilitando cada vez mais a incorporação desse método de armazenamento de energia no cenário global.

Embora o Brasil ainda esteja nos estágios iniciais de estabelecimento de normativas para regular o hidrogênio de baixa emissão, o projeto de lei nº 2308/2023 representa um avanço significativo ao proporcionar incentivos e regulamentações para esse combustível. Vale ressaltar que o Brasil, por sua riqueza natural, possui um vasto potencial para se tornar um líder na produção de hidrogênio de baixo carbono, e é importante que continue avançando nesse caminho promissor.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Norte Energia e a CAPES pelo suporte financeiro fornecido para a realização deste estudo.

REFERÊNCIAS

Schlapbach, L., & Züttel, A. (2001). *Hydrogen-storage materials for mobile applications*. www.nature.com.

Karaca, A. E., & Dincer, I. (2021). An updated overview of Canada's hydrogen related research and development activities. In *International Journal of Hydrogen Energy* (Vol. 46, Issue 69, pp. 34515–34525). Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.07.235.

Hermesmann, M., & Müller, T. E. (2022). Green, Turquoise, Blue, or Grey? Environmentally friendly Hydrogen Production in Transforming Energy Systems. In *Progress in Energy and Combustion Science* (Vol. 90). Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.pecs.2022.100996.

Andersson, J., & Grönkvist, S. (2019). Large-scale storage of hydrogen. In *International Journal of Hydrogen Energy* (Vol. 44, Issue 23, pp.

Öberg, S., Odenberger, M., & Johnsson, F. (2022). Exploring the competitiveness of hydrogen-fueled gas turbines in future energy systems. *International Journal of Hydrogen Energy*, *47*(1), 624–644. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.10.035

Isfahani, S. N. R., & Sedaghat, A. (2016). A hybrid micro gas turbine and solid state fuel cell power plant with hydrogen production and CO2 capture. *International Journal of Hydrogen Energy*, *41*(22), 9490–9499. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.04.065

Rasul, M. G., Hazrat, M. A., Sattar, M. A., Jahirul, M. I., & Shearer, M. J. (2022). The future of hydrogen: Challenges on production, storage and applications. In *Energy Conversion and Management* (Vol. 272). Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.116326

Ministério de Minas e Energia. (2021). Programa Nacional do Hidrogênio.

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.

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

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.

Arcos, J. M. M., & Santos, D. M. F. (2023). The Hydrogen Color Spectrum: Techno-Economic Analysis of the Available Technologies for Hydrogen Production. *Gases*, *3*(1), 25–46. https://doi.org/10.3390/gases3010002.

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

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.

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.

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

M. Kucukvar *et al.*. (2021) "Environmental efficiency of electric vehicles in Europe under various electricity production mix scenarios," *J. Clean. Prod.*, vol. 335, no. June 2021, p. 130291, 2022, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.130291.

BatteryBits (2022) "The Battery Report 2021," *Report*, pp. 1–132.

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

CELA. (2024). Custo Nivelado de Hidrogênio Verde no Brasil. Disponível em: <https://cela.com.br/wp-content/uploads/2023/08/LCOH-pt-1.pdf>. 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.

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

Norte Energia. (2024). Microrrede Fotovoltaica Isolada. Disponível em: <https://www.norteenergiasa.com.br/pdi/microrrede-fotovoltaica-isolada-17> Acesso: 6 de agosto de 24.

White Martins. (2022). White Martins produz o primeiro hidrogênio verde certificado do Brasil. Disponível em: <https://www.whitemartins.com.br/news/2022/white-martins-produz-o-primeiro-hidrog%C3%AAnio-verde-certificado-do-brasil>. Acesso: 15 de agosto de 2024.

COPPE. (2023). Coppe inaugura planta de produção de hidrogênio verde. Disponível em: <https://coppe.ufrj.br/planeta-coppe/coppe-inaugura-planta-de-producao-de-hidrogenio-verde/>. Acesso: 15 de agosto de 2024.

UNIGEL. (2023). Com investimento total de US$ 1,5 bilhão, Bahia terá primeiro projeto de hidrogênio verde em escala industrial no Brasil. Disponível em: <https://www.unigel.com.br/com-investimento-total-de-us-15-bilhao-bahia-tera-primeiro-projeto-de-hidrogenio-verde-em-escala-industrial-no-brasil/>. Acesso: 15 de agosto de 2024.

S. Bajay, Jannuzzi Gilberto, R. Heideier, I. Vilela, J. Paccola, and R. Gomes. (2018) *Geração distribuída e eficiência energética Reflexões para o setor elétrico de hoje e do futuro*, 1ª edição. Campinas-SP: International Energy Initiative.

ESA, "Why Energy Storage? | Energy Storage Assocation," *American Clean Power Association*, 2022. https://energystorage.org/why-energy-storage/ (accessed Aug. 10, 2022).