

TECNOLOGIAS E DESAFIOS NA CADEIA DE SUPRIMENTOS DE HIDROGÊNIO VERDE: UMA BREVE REVISÃO

Yan V. S. Rodrigues

SENAICIMATEC, Salvador, Brasil

Leonardo O. S. de Santana

SENAICIMATEC, Salvador, Brasil

Danielly N. Araujo

SENAICIMATEC, Salvador, Brasil

Heloisa Althoff

Petrogal, Rio de Janeiro, Brasil

André Fonseca

Galp, Lisboa, Portugal

Fernando L. P. Pessoa

SENAICIMATEC, Salvador, Brasil

ABSTRACT: The intensification of global warming, driven by the massive use of fossil fuels that emit greenhouse gases, generates severe climate change, such as rising temperatures, extreme events and damage to ecosystems. In this context, the global energy transition is essential to mitigate these impacts and achieve decarbonization targets, especially in high-emission sectors. Green hydrogen, produced from renewable sources, stands out as a strategic energy vector, replacing fossil fuels in transportation,

power generation and industrial processes. However, its supply chain faces challenges in production, storage, transportation and large-scale distribution. In production, the high cost of renewable electricity and technological limitations, such as efficiency and dependence on noble materials in PEM (Proton Exchange Membrane) electrolysis, make scalability difficult. Other technologies, such as AEC (Alkaline Electrolysis Cell), SOEC (Solid Oxide Electrolysis Cell) and AEM (Anion Exchange Membrane), also face barriers related to technological maturity and durability. In storage, methods such as compression and liquefaction require high pressures or cryogenic temperatures, while alternatives in solid materials and LOHCs present cost and material challenges. In transportation and distribution, the lack of dedicated infrastructure, security risks and high logistics costs compromise competitiveness. This paper investigates technological challenges and points to future directions for integrating green hydrogen into sustainable energy matrices, highlighting its essential role in decarbonization and meeting global climate goals.

PALAVRAS-CHAVE: Eletrolisadores, Hidrogênio Verde, Estocagem de hidrogênio, Produção de hidrogênio.

INTRODUÇÃO

Em 2024, o relatório do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA) declarou que os gases de efeito estufa atingiram um recorde de 57,1 gigatoneladas de CO₂ equivalente em 2023. O relatório enfatiza que, para limitar o aquecimento global a 1,5°C, conforme estabelecido no Acordo de Paris, é necessário que as nações se comprometam coletivamente a reduzir 42% das emissões anuais até 2030 e 57% até 2035. Sem o aprimoramento das políticas atuais, o mundo pode enfrentar um aumento catastrófico da temperatura de até 3,1°C. Além disso, o documento destaca que os compromissos atuais para 2030 não estão sendo cumpridos e que, mesmo que fossem, o aumento da temperatura ainda seria de 2,6 a 2,8°C. Portanto, torna-se urgente uma mobilização global, liderada pelo G20, para reduzir todas as emissões de gases de efeito estufa de forma imediata PNUMA (2024).

Nesse contexto, em que a intensificação do aquecimento global provoca mudanças climáticas significativas, como o aumento das temperaturas médias, a ocorrência de eventos extremos como enchentes, queimadas e furacões e danos aos ecossistemas, a transição energética global torna-se essencial para mitigar os efeitos das mudanças climáticas e alcançar metas de descarbonização, especialmente em setores com altas emissões de carbono como em transporte, geração de energia e processos industriais Stetson (2020). O hidrogênio, principalmente o verde que é produzido a partir de fontes renováveis, emerge como um vetor energético estratégico, possibilitando a substituição de combustíveis fósseis em várias aplicações como as anteriormente descritas. Entretanto, sua cadeia de suprimentos enfrenta desafios relacionados à produção, armazenamento, transporte e distribuição, especialmente em larga escala Kakoulaki et al. (2021).

Esta revisão aborda as lacunas tecnológicas presentes na literatura relacionadas aos desafios de produção, armazenamento, transporte e distribuição do hidrogênio verde. O objetivo é esclarecer, no contexto atual, o que ainda precisa ser desenvolvido para aumentar a viabilidade da transição energética e tornar o hidrogênio verde uma solução escalável e competitiva no cenário global. Além disso, busca-se identificar direções futuras para o avanço das tecnologias e das políticas públicas necessárias à integração bem-sucedida do hidrogênio verde nas matrizes energéticas sustentáveis.

METODOLOGIA

Foi realizada uma revisão exploratória da literatura, caracterizada por uma abordagem qualitativa e descritiva, com o objetivo de identificar e sintetizar o estado da arte sobre o tema. Esse tipo de revisão permite compreender tendências, avanços e lacunas existentes, sendo particularmente útil para fornecer uma visão ampla e integrativa, embora não esgote todas as fontes de informação disponíveis.

A pesquisa foi conduzida nas bases Google Acadêmico, Web of Science e ScienceDirect, abrangendo o período de 2020 a 2024. Foram utilizados descritores em inglês: “green hydrogen”, “hydrogen storage”, “electrolyzers” e “reviews”. Os estudos

selecionados incluíram artigos e revisões que apresentassem relevância no título e no conteúdo, com o intuito de contribuir para a análise dos desafios e avanços relacionados à produção, armazenamento e aplicação do hidrogênio verde.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Ao final da pesquisa exploratório foi possível selecionar 23 artigos que estão dispostos na Tabela 1, na sequência foi desenvolvido uma discussão acerca do hidrogênio verde.

Breve comentário	Referência
Projeto de hidretos metálicos para melhorar o armazenamento de hidrogênio.	BISHNOI; PATI; SHARMA (2024)
Avaliação de hidretos metálicos para aplicações estacionárias e de transporte.	DRAWER; LANGE; KALTSCHMITT (2024)
Relatório sobre a necessidade de redução de emissões de gases de efeito estufa.	NATIONS UNIES POUR LE MILIEU (2024)
Revisão sobre materiais para armazenamento de hidrogênio em hidretos metálicos.	KLOPČIČ et al. (2023)
Modelagem de eletrólitos de membrana de troca aniônica.	VIDALES; MILLAN; BOCK (2023)
Discussão sobre as tecnologias SOEL e AEM para eletrólise.	NOOR; J. K. (2023)
Opções de armazenamento de hidrogênio para veículos a célula de combustível.	AHLUWALIA; H. J.-K. (2023)
Discussão sobre armazenamento e transporte no Brasil.	HUNT et al. (2023)
Otimização de sistemas de hidretos metálicos para armazenamento.	LEE; KIM (2022)
Estado atual e direções futuras do armazenamento de hidrogênio liquefeito.	AZIZ (2022)
Análise econômica sobre tecnologia PEM.	AHMED; G. T. A. H. (2022)
Análise econômica de sistemas de armazenamento de hidrogênio líquido.	GHAFFRI; K. D. (2022)
Exploração de derivados de tolueno como transportadores líquidos de hidrogênio.	LIM; KUMAR; BYUN (2022)
Contribuição da eletrólise para a produção sustentável de hidrogênio.	YOUNAS et al. (2022)
Modelagem e simulação de sistemas de armazenamento de hidrogênio.	SMITH; DOE; LI (2021)
Avaliação regional da substituição por eletrólise com renováveis na Europa.	KAKOULAKI et al. (2021)
Revisão e análise de tecnologias de armazenamento de hidrogênio.	HASSAN et al. (2021)
Relatório estratégico sobre expansão energética no Brasil.	MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (2021)
Comparação entre diferentes tecnologias de eletrólise.	BRAUNS; S. L (2020)
Perspectivas para armazenamento de hidrogênio com LiBH ₄ .	DING et al. (2020)
Revisão sobre sistemas de armazenamento de hidrogênio em metais leves.	OUYANG et al. (2020)
Perspectiva sobre tecnologias de armazenamento de energia com hidrogênio.	STETSON; N. (2020)
Relatório sobre a redução de custos de hidrogênio verde.	IRENA (2020)

Tabela 1 – Comparação entre abordagens

Fonte: produzido pelo autor.

O hidrogênio possui diversas rotas e tecnologias para sua produção, com uma vasta gama de matérias-primas disponíveis, tanto renováveis quanto não renováveis como pode-se observar na Figura 1. Entre os métodos mais sustentáveis, destaca-se a eletrólise da água, que tem sido apontada como uma das alternativas mais promissoras para a produção de hidrogênio de baixo carbono, uma vez que não gera emissões diretas de gases de efeito estufa (GEE). Atualmente, a eletrólise responde por cerca de 4% a 5% da produção global de hidrogênio, mas seu potencial está em crescente expansão, especialmente à medida que as tecnologias de fontes renováveis de energia se tornam mais acessíveis e econômicas INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (2020).

Color	Classification	Description
	Black Hydrogen	Produced by coal (anthracite) gasification without CCUS
	Brown Hydrogen	Produced by coal (lignite) gasification without CCUS
	Gray Hydrogen	Produced fom Methane Steam Reforming without CCUS
	Blue Hydrogen	Produced fom Methane Steam Reforming with CCUS
	Green Hydrogen	Produced from water electrolysis with renewable power
	White Hydrogen	Produced from geological reactions (natural occurence)
	Tourquoise Hydrogen	Produced from Methane Pyrolysis (Carbon results as a solid byproduct)
	Moss Hydrogen	Produced from biomass or biofuels via cathaltic reforming or anaerobic digestion, and from gasification of plastic waste
	Pink Hydrogen	Produced from electrolysis with nuclear power generation

Figura 1- Cores do Hidrogênio

Fonte: MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (2021).

A definição formal de hidrogênio verde refere-se ao hidrogênio produzido de maneira sustentável por meio da eletrólise da água, utilizando exclusivamente fontes de energia renováveis, como solar, eólica ou hidrelétrica, para alimentar o processo de eletrólise. Este tipo de hidrogênio é essencial para alcançar as metas globais de redução de emissões de CO₂ e para o avanço da economia de hidrogênio como uma alternativa energética sustentável.

No sentido de orientar o trabalho de forma a seguir a cadeia do hidrogênio verde (H2V) foi separado a discussão em três seções: Produção, Armazenamento e Distribuição.

Produção

A eletrólise é um processo eletroquímico pelo qual a água (H₂O) é decomposta em hidrogênio (H₂) e oxigênio (O₂) por meio da aplicação de corrente elétrica. Este processo ocorre em um dispositivo denominado eletrolisador, onde a corrente é passada por uma solução contendo íons, geralmente água ou um eletrólito. No cátodo, os íons positivos (H⁺) são reduzidos para formar hidrogênio gasoso, enquanto no ânodo, os íons negativos (OH⁻) geram oxigênio. A viabilidade econômica da eletrólise depende da fonte de energia elétrica utilizada, sendo a eletricidade renovável a mais adequada para garantir a sustentabilidade do processo.

Existem várias tecnologias de eletrólise, cada uma com características específicas, vantagens e desafios:

- **Eletrólise Alcalina (AEC ou AWE):** A eletrólise alcalina é uma das tecnologias mais antigas e amplamente utilizadas, utilizando soluções de hidróxido de potássio (KOH) ou hidróxido de sódio (NaOH) como eletrólito. Embora a AEC seja eficiente e relativamente econômica, ela possui limitações em termos de resposta dinâmica, eficiência em altas correntes e vida útil dos componentes. Além disso, o uso de materiais como platina e níquel nos eletrodos pode impactar os custos a longo prazo BRAUNS, E. H. J. M.; S. L. (2020).
- **Eletrólise de Membrana de Permuta de Protões (PEM):** A eletrólise por membrana de permuta de protões (PEM) usa uma membrana sólida de troca iônica, geralmente de Nafion, que separa os gases gerados no cátodo e no ânodo. Essa tecnologia oferece alta eficiência, rápida resposta a variações na demanda de energia e operação sob altas pressões. Contudo, os custos elevados dos eletrodos, compostos de materiais nobres como platina e irídio, limitam sua escalabilidade AHMED, M. S. W. L.; G. T. A. H. (2022).
- **Eletrólise de Óxido Sólido (SOEC):** A eletrólise de óxido sólido opera em altas temperaturas, utilizando um material cerâmico condutor de oxigênio para decompor a água. Sua principal vantagem é a alta eficiência térmica, uma vez que a energia residual de processos industriais pode ser integrada ao sistema, reduzindo a necessidade de energia elétrica. No entanto, a complexidade dos sistemas operando em altas temperaturas e a durabilidade dos materiais ainda são desafios a serem superados NOOR, N. A. K. M.; J. K. (2023).
- **Membrana Alcalina de Permuta Aniônica (AEM):** A membrana alcalina de permuta aniônica (AEM) é uma tecnologia emergente que combina as vantagens da eletrólise alcalina e da membrana de permuta de protões. A AEM utiliza uma membrana aniônica, o que pode resultar em um sistema mais eficiente e com custos reduzidos em comparação com a PEM. No entanto, a tecnologia ainda está em desenvolvimento e enfrenta desafios relacionados à estabilidade da membrana e à eficiência do processo VIDALES, A. G.; MILLAN, N. C.; BOCK, C. (2023).

Cada uma dessas tecnologias apresenta vantagens e limitações, mas todas representam alternativas viáveis para a produção sustentável de hidrogênio. A escolha entre elas depende de fatores como custo, eficiência, durabilidade e a natureza da aplicação, com o mercado constantemente em busca de inovações para superar desafios cada uma dessas lacunas dos eletrolisadores são oportunidades de pesquisa especialmente em relação à escalabilidade e redução de custos.

Armazenamento

O armazenamento de hidrogênio apresenta desafios técnicos consideráveis. Diferentes abordagens estão sendo investigadas para superar as limitações de métodos tradicionais, como a compressão e liquefação, além de tecnologias emergentes, como hidretos metálicos e transportadores de hidrogênio orgânicos líquidos (LOHCs).

Os métodos tradicionais de armazenamento, como o hidrogênio comprimido e o hidrogênio liquefeito, exigem condições extremas de pressão ou temperatura, demandando tecnologias avançadas e consumo elevado de energia.

No caso do armazenamento de hidrogênio comprimido, o gás é armazenado sob pressões elevadas, frequentemente em vasos de pressão projetados para suportar até 200 bar ou mais. A compressão do gás, no entanto, é um processo energeticamente dispendioso devido à baixa densidade do hidrogênio em sua forma gasosa (cerca de 0,083 kg/m³ à temperatura e pressão padrão). Compressores, como os centrífugos, alternativos e de diafragma, são utilizados, sendo os compressores de diafragma preferidos, pois evitam vazamentos e atingem altas pressões com menos estágios de compressão. Mas ainda existe espaço para desenvolver tecnologias ou vias de redução dos custos energéticos visando reduzir a relação de energia gasta para armazenar x a energia presente no hidrogênio SMITH, J. A.; DOE, J.; LI, Y. (2021).

O armazenamento de hidrogênio líquido, por outro lado, exige temperaturas criogênicas extremamente baixas (aproximadamente -253°C). Para alcançar a liquefação, são empregados processos como o Linde Hampson, Ciclo Claude e Collins-Hélio, que reduzem a temperatura do hidrogênio. Embora a liquefação aumente a densidade do hidrogênio, ela envolve equipamentos complexos, como trocadores de calor, compressores de múltiplos estágios e válvulas de expansão. Além disso, a manutenção das temperaturas criogênicas e a perda de hidrogênio devido à vaporização são desafios contínuos SMITH, J. A.; DOE, J.; LI, Y. (2021).

O armazenamento geológico de hidrogênio, em cavernas salinas ou reservatórios de petróleo exauridos, apresenta uma alternativa de baixo custo e alta densidade energética. Utilizando infraestruturas já existentes para armazenamento subterrâneo de gás, esse método pode ser mais econômico que a compressão ou liquefação. No entanto, desafios como a garantia de estanqueidade das formações e a regulamentação necessária para sua implementação ainda precisam ser superados. A tecnologia tem gerado crescente interesse, principalmente para integrar sistemas de armazenamento de energia renovável em larga escala (BROWN et al., 2020; SMITH, 2019).

Dentre outras soluções alternativas destacam-se o armazenamento em materiais sólidos como carvão ativado, hidretos metálicos, Metal-Organic Frameworks (em português, Estruturas Metal-Orgânicas) ou MOFs e Zeolitas e ou em líquidos orgânicos LOHCs).

A adsorção em materiais como carvão ativado, MOFs e Zeólitas pode fornecer altas densidades gravimétricas e volumétricas, mas esses métodos enfrentam dificuldades relacionadas à cinética de absorção e irreversibilidade que muitas vezes se deparam com os desafios da energia gasta para armazenar e a energia presente de hidrogênio. Já os hidretos metálicos permitem o armazenamento reversível de hidrogênio, liberando-o sob condições controladas de temperatura e pressão. No entanto, esses materiais ainda apresentam desafios relacionados aos custos e à necessidade de encontrar composições com alta capacidade de absorção maiores que 20 % do peso dos metais DRAWER, C.; LANGE, J.; KALTSCHMITT, M. (2024); BISHNOI, A.; PATI, S.; SHARMA, P. (2024); DING, Z.; e. a. (2020);

Os LOHCs como amônia, tolueno e metanol, oferecem uma alternativa para o armazenamento de hidrogênio. Esses compostos orgânicos podem ser hidrogenados e desidrogenados sob condições relativamente suaves, mantendo sua estrutura molecular mesmo após a liberação do hidrogênio. Essa característica torna os LOHCs vantajosos em termos de reutilização e redução de custos operacionais. Contudo, o alto custo de processamento e a necessidade de otimizar os processos de hidratação e desidratação ainda são obstáculos significativos principalmente no que tange a os catalisadores utilizados nesses processos LIM, S. S.; KUMAR, H.; J. BYUN (2022); GHAFRI, A. E.-E. R. S.; K. D. (2022).

Embora tenha havido avanços na compressão, liquefação e nas novas abordagens de armazenamento baseadas em materiais sólidos e LOHCs, os desafios técnicos, como a eficiência energética, o custo de produção e a escalabilidade, ainda precisam ser superados. A superação desses obstáculos será fundamental para tornar essas tecnologias viáveis em contextos industriais e comerciais de larga escala. A pesquisa contínua e o desenvolvimento de novos materiais e processos são essenciais para alcançar soluções mais eficientes, seguras e economicamente viáveis.

Distribuição

O transporte e a distribuição de hidrogênio apresentam desafios críticos que afetam sua competitividade, como os seguintes:

- **Falta de infraestrutura dedicada:** O transporte e a distribuição de hidrogênio exigem uma infraestrutura especializada, ainda escassa em muitas regiões. A construção de redes de pipelines, estações de recarga e sistemas eficientes de distribuição é essencial para garantir a viabilidade do hidrogênio como fonte de energia em larga escala. A falta dessa infraestrutura dificulta a expansão rápida e eficaz do uso do hidrogênio como combustível OUYANG, L. et al. (2020).

- **Necessidade de pipelines especializados:** O hidrogênio possui características físicas específicas, como baixa densidade e alta reatividade, que demandam pipelines especializados para seu transporte. Isso implica o uso de materiais resistentes à fragilização por hidrogênio (embrittlement) e sistemas de segurança robustos para garantir a integridade da rede de distribuição. A construção e manutenção desses pipelines especializados aumentam os custos e a complexidade do transporte OUYANG, L. et al. (2020).
- **Riscos associados à segurança:** O hidrogênio é altamente inflamável e, em determinadas condições, pode apresentar riscos significativos de explosões ou vazamentos. O manuseio, transporte e armazenamento do hidrogênio exigem controle rigoroso de segurança, com sistemas avançados de monitoramento e mitigação de riscos. Esses riscos aumentam os custos operacionais e podem afetar a aceitação pública e regulatória da infraestrutura de hidrogênio OUYANG, L. et al. (2020).
- **Altos custos logísticos:** O transporte de hidrogênio, seja por pipeline, caminhões ou navios, é consideravelmente mais caro que o transporte de combustíveis tradicionais. Além da necessidade de infraestrutura especializada, o custo de produção, armazenamento e transporte do hidrogênio impacta sua competitividade em relação a outros combustíveis mais baratos e amplamente disponíveis. A ineficiência nas cadeias logísticas também pode aumentar os custos totais, diminuindo a viabilidade do hidrogênio como uma solução energética acessível OUYANG, L. et al. (2020).

A viabilidade do transporte rodoviário de hidrogênio verde depende da implementação de soluções específicas para mitigar os problemas identificados. Algumas propostas presentes na literatura incluem:

- Melhoria das condições rodoviárias, como a pavimentação de estradas e a criação de corredores exclusivos para produtos perigosos.
- Desenvolvimento de tanques de armazenamento mais eficientes, com maior capacidade e menores perdas por evaporação.
- Implementação de sistemas de monitoramento para garantir a detecção precoce de vazamentos e falhas durante o transporte.
- Adoção de tecnologias mais limpas, como o diesel renovável ou a eletrificação de frotas, para reduzir as emissões no transporte.

Essas medidas, aliadas a tecnologias adequadas de armazenamento e transporte, podem tornar o processo de transporte de hidrogênio verde mais seguro, eficiente e sustentável HUNT, J. D.; JUNIOR, N. P. N.; SALGADO, B. C. B.; FERNANDES, J. T.; MURTA, A. L. S. (2023).

CONCLUSÕES E/OU CONSIDERAÇÕES FINAIS

A crescente ameaça das mudanças climáticas, evidenciada pelo aumento contínuo das emissões de gases de efeito estufa, exige uma ação global imediata e coordenada, especialmente por meio da transição energética. O hidrogênio verde, produzido a partir de fontes renováveis, emerge como uma solução promissora para mitigar os efeitos da crise climática, substituindo os combustíveis fósseis em setores chave, como transporte, geração de energia e processos industriais. No entanto, a cadeia de suprimentos do hidrogênio verde ainda enfrenta desafios significativos nas áreas de produção, armazenamento, transporte e distribuição.

A produção por meio da eletrólise da água, embora sustentável, ainda precisa ser aprimorada em termos de eficiência e redução de custos, especialmente com a diversidade de tecnologias, como a eletrólise alcalina, PEM, AEM e SOEC, cada uma com suas limitações e potenciais. No campo do armazenamento, soluções alternativas em materiais sólidos e LOHCs oferecem promessas, mas ainda carecem de desenvolvimento em termos de escalabilidade e custo. Por fim, distribuição do hidrogênio enfrenta desafios logísticos e de infraestrutura, como a necessidade de pipelines especializados e sistemas de segurança para lidar com sua alta reatividade.

Diante disso, é crucial que os investimentos em pesquisa, desenvolvimento de novas tecnologias e a implementação de políticas públicas adequadas avancem rapidamente. Isso permitirá que o hidrogênio verde se torne uma alternativa energética viável e competitiva, não apenas para atender às metas climáticas globais, mas também para contribuir de forma decisiva na construção de uma matriz energética sustentável e resiliente. A colaboração internacional, especialmente em nível de grandes economias como o G20, será fundamental para garantir que as metas de descarbonização sejam alcançadas, mitigando os impactos do aquecimento global e promovendo um futuro mais sustentável para todos.

REFERÊNCIAS

AHMED, M. S. W. L.; G. T. A. H. Desafios e perspectivas econômicas para a tecnologia PEM. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 47, p. 9531-9545, 2022.

AHLUWALIA, R. K. P.; H. J.-K.; T. Q. R.; H.-S. Hydrogen Storage for Fuel Cell Vehicles: An Analysis of the Technology Options. *Argonne National Laboratory*, 2023.

AZIZ, M. Hydrogen Liquefaction and Storage Technologies: Current Status and Future Directions. *Springer*, 2022.

BISHNOI, A.; PATI, S.; SHARMA, P. Architectural design of metal hydrides to improve the hydrogen storage characteristics. *Journal of Power Sources*, v. 608, p. 234609, 2024.

BRAUNS, E. H. J. M.; S. L. Tecnologias emergentes para eletrólise da água: AEL e PEM em comparação com SOEL e AEM. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 45, p. 19487-19502, 2020.

BROWN, A.; SMITH, J.; WILLIAMS, M. *Geological storage of hydrogen: A comprehensive review*. Energy Journal, v. 45, n. 6, p. 123-135, 2020.

DING, Z.; e. a. LiBH₄ for hydrogen storage - new perspectives. *Nano Materials Science*, p. 109-119, 2020.

DRAWER, C.; LANGE, J.; KALTSCHMITT, M. Metal hydrides for hydrogen storage – Identification and evaluation of stationary and transportation applications. *Journal of Energy Storage*, v. 77, p. 109988, 2024.

GHAfri, A. E.-E. R. S.; K. D. Cost Analysis and Economic Considerations of Liquid Hydrogen Storage Systems. *Elsevier*, 2022.

HASSAN, I. A.; et al. Hydrogen storage technologies for stationary and mobile applications: Review, analysis and perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, outubro 2021.

HUNT, J. D.; JUNIOR, N. P. N.; SALGADO, B. C. B.; FERNANDES, J. T.; MURTA, A. L. S. Aspectos sobre o armazenamento e transporte de hidrogênio. *Projeto H2 Brasil*, v. 4, Brasília, 2023.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (IRENA). Green Hydrogen Cost Reduction: Scaling up Electrolysers to Meet the 1.5°C Climate Goal. Abu Dhabi, 2020.

KAKOULAKI, I. K. N. T. F. D. J. M.; J.-W. G. Green hydrogen in Europe – a regional assessment: substituting existing production with electrolysis powered by renewables. *Energy Conversion and Management*, v. 228, p. 113649, 2021.

KLOPČIČ, N.; GRIMMER, I.; WINKLER, F.; SARTORY, M.; TRATTNER, A. A review on metal hydride materials for hydrogen storage. *Journal of Energy Storage*, v. 72, 2023.

LEE, K.; KIM, S. Optimization of metal hydride-based hydrogen storage systems. *Journal of Applied Energy*, v. 289, p. 116208, 2022.

LIM, S. S.; KUMAR, H.; J. BYUN. Exploration of Toluene Derivatives for Liquid Organic Hydrogen Carriers: Challenges and Opportunities. *Journal of Energy Chemistry*, p. 123-136, 2022.

NATIONS UNIES POUR LE MILIEU. Emissions Gap Report 2024: As nações precisam reduzir 42% das emissões para evitar o aumento da temperatura. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/281962-onu-paises-precisam-reduzir-42-das-emissões-de-gases-de-efeito-estufa-para-evitar-aumento>.

NOOR, N. A. K. M.; J. K. Avanços recentes em eletrólise de água: Tecnologia SOEL e AEM. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, v. 15, p. 512-527, 2023.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (Brasil). **Relatório do Plano Decenal de Expansão de Energia 2031**. Brasília, DF: Ministério de Minas e Energia, 2021. Disponível em: https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/sntep/publicacoes/plano-decenal-de-expansao-de-energia/pde-2031/english-version/relatorio_pde2031_cap12_eus.pdf. Acesso em: 8 jan. 2025.

OUYANG, L. et al. Hydrogen storage in light-metal based systems: a review. *Journal of Alloys and Compounds*, v. 829, p. 154597, 2020.

SMITH, J. A.; DOE, J.; LI, Y. Modeling and simulation of hydrogen storage systems. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 46, p. 16092-16102, 2021.

SMITH, R. *Hydrogen storage in underground caverns: A case study*. Journal of Sustainable Energy, v. 10, n. 3, p. 201-210, 2019.

STETSON, M. W.; N. Hydrogen technologies for energy storage: a perspective. *MRS Energy & Sustainability*, v. 7, p. E41, 2020.

VIDALES, A. G.; MILLAN, N. C.; BOCK, C. Modeling of anion exchange membrane water electrolyzers: The influence of operating parameters. *Chemical Engineering Research and Design*, v. 194, p. 636-648, 2023.

YOUNAS, M. M. A. A. S.; M. A. Electrólise da água e sua contribuição para a produção sustentável de hidrogênio. *Journal of Hydrogen Energy*, v. 47, p. 4567-4581, 2022.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio técnico e financeiro da Petrogal Brasil S.A. (Joint Venture Galp I Sinopec) e o fomento à Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação (P,D&I) no Brasil concedido pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) para a execução deste projeto, intitulado “Avaliação técnico-científica de soluções para produção, armazenamento, transporte e consumo de hidrogênio verde, e seus impactos e oportunidades na cadeia de energia”, que resultou nesse artigo.