

Armazenamento de Hidrogênio e a Economia: O Impacto dos Hidretos de Magnésio e seu potencial econômico

William Oliveira Júnior¹, Josy Kelly Lima Ribeiro¹, Luiz Henrique Oliveira Corcino Vieira¹, Daniel Ferreira Gonçalves¹, Daniel Corrêa Souza¹, Erenilton Pereira da Silva¹

¹Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Janaúba/MG, Brasil
(william.oliveira@ufvjm.edu.br)

Resumo: Os hidretos metálicos, especialmente de magnésio e magnésio-níquel, representam tecnologias promissoras para armazenamento de hidrogênio com impactos econômicos significativos. Esta revisão analisa 8 estudos recentes sobre aplicações industriais, competitividade econômica e perspectivas mercadológicas. Os resultados indicam potencial de crescimento substancial no setor de energia limpa, com aplicações em mobilidade, baterias e armazenamento estacionário.

Palavras-chave: Hidretos metálicos; Magnésio; Armazenamento de hidrogênio; Economia; Energia renovável.

INTRODUÇÃO

A transição para uma economia de baixo carbono intensificou a demanda por soluções de armazenamento de energia eficientes e econômicas. O desenvolvimento de tecnologias para armazenamento de hidrogênio constitui um dos principais desafios para a consolidação da economia do hidrogênio (Chanchetti et al., 2014). Os hidretos metálicos emergem como alternativa promissora devido às suas características de segurança, densidade energética e viabilidade econômica (Manoharan et al., 2019). Entre os materiais mais estudados, destacam-se os hidretos de magnésio (MgH_2) e as ligas de magnésio-níquel, que apresentam propriedades específicas para diferentes aplicações industriais.

A relevância econômica dos hidretos metálicos baseia-se na crescente demanda por soluções de armazenamento de energia limpa, impulsionada por políticas ambientais e necessidades de descarbonização industrial. Este cenário justifica a necessidade de uma análise abrangente do impacto econômico dessas tecnologias, considerando aspectos técnicos, mercadológicos e de competitividade setorial.

Esta visão geral examina as tendências econômicas no uso de hidretos metálicos para armazenamento em estado sólido, comparando-as com outras tecnologias de armazenamento de energia, como hidrogênio comprimido, hidrogênio líquido, baterias e outras. A análise baseia-se em insights de trabalhos de pesquisa recentes para fornecer uma compreensão abrangente do estado atual e das perspectivas futuras dos sistemas de armazenamento baseados em hidreto metálico.

MATERIAL E MÉTODOS

Esta revisão sistemática da literatura foi conduzida mediante busca em bases de dados científicas indexadas, incluindo Web of Science, Scopus e Google Scholar. Os critérios de inclusão compreenderam: (a) publicações em inglês e português; (b) período de 2014 a 2024; (c) foco em aspectos econômicos e/ou aplicações industriais de hidretos metálicos; (d) relevância temática para magnésio e ligas magnésio-níquel.

Foram identificados inicialmente 127 artigos, dos quais 8 foram selecionados após aplicação dos critérios de exclusão. A análise seguiu abordagem qualitativa, organizando os resultados por categorias temáticas: competitividade econômica, aplicações industriais, perspectivas de mercado e desafios tecnológicos.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Competitividade econômica de hidretos metálicos

Os hidretos metálicos estão ganhando força devido ao seu potencial para enfrentar os desafios do armazenamento de hidrogênio, particularmente em termos de custo e eficiência. Estudos recentes indicam que os sistemas de hidreto metálico podem ser competitivos em termos de custos com os sistemas de gás comprimido sob certas condições. Por exemplo, $TiFe0,85Mn0,05$ e sistemas MH complexos mostraram custos nivelados de armazenamento (LCOS) de 0,453/kWh e 0,453/kWh, respectivamente, em comparação com \$0,397/kWh para sistemas de gás comprimido de 350 bar (Wang et al., 2024). Essas descobertas sugerem que os

hidretos metálicos podem ser economicamente viáveis, especialmente quando os custos de fabricação de materiais são otimizados e os ciclos operacionais são estendidos.

No entanto, a relação custo-benefício dos hidretos metálicos é altamente dependente de fatores como taxas de carga e descarga, ciclos operacionais e custos de produção de material. Por exemplo, estender os tempos de carregamento e aumentar os ciclos operacionais pode reduzir significativamente o LCOS, tornando os hidretos metálicos mais competitivos para aplicações que exigem carregamento lento e armazenamento de energia de longa duração (Wang et al., 2024). Além disso, aproveitar o calor residual das células de combustível e melhorar a absorção de hidrogênio pode aumentar ainda mais a viabilidade econômica dos sistemas de hidreto metálico (Wang et al., 2024).

3.2 Análise Técnico-Econômica dos Hidretos Metálicos

A análise técnico-econômica dos sistemas de armazenamento de hidrogênio revela que os hidretos metálicos apresentam vantagens competitivas em aplicações específicas. Manoharan et al. (2019) demonstram que, para aplicações ferroviárias, os hidretos metálicos oferecem densidade energética superior aos sistemas de hidrogênio comprimido, embora com limitações relacionadas à gestão térmica e custos de produção.

O estudo comparativo de diferentes tecnologias de armazenamento indica que os hidretos de magnésio (MgH_2) atingem capacidades gravimétricas de 7,6% em peso, superando significativamente os sistemas convencionais de alta pressão (Bruziano et al., 2023). Esta característica é particularmente relevante para aplicações onde o peso constitui fator limitante, como na indústria aeroespacial e naval.

3.3 Comparação com outras tecnologias de armazenamento de energia

Hidrogênio comprimido

O armazenamento de hidrogênio comprimido é um dos métodos mais comuns de armazenamento de hidrogênio, mas requer condições de alta pressão, o que pode levar a custos mais altos e questões de segurança. Os hidretos metálicos oferecem uma vantagem significativa em termos de pegada terrestre, exigindo até 65% menos terra do que os sistemas de gás comprimido de 170 bar (Wang et al., 2024). No entanto, os sistemas de hidrogênio comprimido têm maior eficiência de armazenamento (99%) em comparação aos hidretos metálicos, o que pode compensar seus custos mais altos em certas aplicações (Munadi & Supramono, 2024).

Hidrogênio líquido

O armazenamento de hidrogênio líquido envolve o resfriamento do hidrogênio a temperaturas extremamente baixas, o que consome muita energia e é caro. Embora o hidrogênio líquido tenha uma alta densidade de energia, seus custos de armazenamento são significativamente maiores do que os dos hidretos metálicos. Por exemplo, foi relatado que os sistemas de armazenamento de hidrogênio líquido têm custos de até 11,51/kg, em comparação com 2,95/kg para hidretos metálicos (Munadi & Supramono, 2024). No entanto, o hidrogênio líquido ainda é preferido para certas aplicações de nicho devido à sua alta densidade de energia e infraestrutura estabelecida.

Baterias

As baterias, principalmente as baterias de íon-lítio, são amplamente usadas para armazenamento de energia devido à sua alta eficiência e custos relativamente baixos. No entanto, os hidretos metálicos têm o potencial de competir com as baterias em termos de densidade de energia. Por exemplo, foi demonstrado que hidretos metálicos nanoconfinados atingem densidades de energia comparáveis ou até maiores do que as baterias de íon-lítio de última geração (Stavila et al., 2024). Além disso, os hidretos metálicos podem operar em temperaturas e pressões mais baixas, tornando-os uma opção mais segura e ecológica para determinadas aplicações (Adametz et al., 2016).

Carregadores de amônia e hidrogênio orgânico líquido

A amônia e os transportadores de hidrogênio orgânico líquido (LOHCs) estão surgindo como tecnologias alternativas de armazenamento de hidrogênio. Embora os LOHCs tenham o menor custo de sistema de \$2,84/kg, sua eficiência de armazenamento é de apenas 8,73%, o que limita sua praticidade para aplicações de grande escala (Munadi & Supramono, 2024). A amônia, por outro lado, tem maior eficiência de armazenamento, mas custos significativamente mais altos, tornando-a menos competitiva com hidretos metálicos na maioria dos cenários (Munadi & Supramono, 2024).

3.4 Aplicações Industriais e Setoriais

As aplicações industriais dos hidretos metálicos abrangem múltiplos setores, desde baterias automotivas até sistemas de armazenamento estacionário. Hossain et al. (2022) analisam o processo de reciclagem de baterias níquel-hidreto metálico (NiMH) de veículos híbridos, demonstrando taxas de recuperação de 93,34% para níquel e 99,03% para cobalto, evidenciando a viabilidade econômica da cadeia circular.

A prospecção tecnológica realizada por Chanchetti et

al. (2014) em documentos de patentes revela concentração de inovações em materiais à base de magnésio, com queda no patenteamento após 2008, sugerindo amadurecimento tecnológico. Este padrão indica oportunidades para desenvolvimento de aplicações comerciais baseadas em tecnologias consolidadas.

3.5 Perspectivas de Mercado e Competitividade

As perspectivas de mercado para hidretos metálicos são influenciadas pela evolução da economia do hidrogênio e políticas de descarbonização. Kaya et al. (2020) identificam limitações competitivas das baterias NiMH em veículos elétricos híbridos, especialmente quando comparadas a tecnologias emergentes como baterias de zinco-níquel e íons de lítio.

A análise de viabilidade econômica demonstra que sistemas baseados em hidretos metálicos requerem otimização de custos para competir efetivamente com alternativas estabelecidas. Baykara et al. (2025) destacam que, embora os hidretos metálicos ofereçam alta capacidade de armazenamento, enfrentam desafios relacionados à gestão térmica e custos de produção em escala comercial.

3.6 Inovações Tecnológicas e Sustentabilidade

As inovações recentes em hidretos metálicos focam na melhoria da eficiência e redução de custos produtivos. Zhang et al. (2015) desenvolveram síntese atom-econômica de hidróxido de níquel através de células de combustível Ni-O₂, reduzindo significativamente a geração de resíduos químicos e melhorando a performance como material para baterias níquel-hidreto metálico.

A integração de técnicas de inteligência artificial e aprendizado de máquina emerge como ferramenta promissora para otimização de composições de ligas. Khan et al. (2024) utilizaram algoritmos híbridos GA-PSO-LSSVM para predição da capacidade de armazenamento de hidrogênio em ligas AB₂, atingindo precisão de 98% e identificando elementos como Sn, Co e Ni como principais influenciadores da performance.

3.7 Análise técnico-econômica de hidretos metálicos

Principais fatores de custo

O custo dos sistemas de hidreto metálico é influenciado por vários fatores, incluindo custos de produção de material, projeto do sistema e parâmetros operacionais. Por exemplo, o custo da produção de hidreto metálico pode variar entre 10/kge10/kge30/kg, dependendo do material e do processo de fabricação (Wang et al., 2024) (Danebergs & Deledda, 2023). Além disso, a

eficiência dos processos de absorção e dessorção de hidrogênio desempenha um papel fundamental na determinação da relação custo-benefício geral dos sistemas de hidreto metálico. Avanços recentes em hidretos metálicos nanoestruturados melhoraram suas propriedades termodinâmicas e cinéticas, reduzindo a energia necessária para a liberação e absorção de hidrogênio (Stavila et al., 2024) (Abdulkadir et al., 2024).

Eficiência e desempenho

Os hidretos metálicos geralmente têm densidades de energia mais altas do que os sistemas de armazenamento de gás comprimido, tornando-os mais adequados para aplicações em que o espaço é uma restrição. No entanto, sua eficiência é menor em comparação com o hidrogênio comprimido, principalmente devido à energia necessária para a absorção e dessorção do hidrogênio. Por exemplo, a demanda de energia para liberação de hidrogênio inclui o calor necessário para aquecer o hidreto até a temperatura de dessorção, o calor da reação e o trabalho de compressão para atingir a pressão de saída desejada (Adametz et al., 2016). As análises de sensibilidade mostraram que o calor da reação é o parâmetro mais influente que afeta a eficiência geral dos sistemas de hidreto metálico (Adametz et al., 2016).

Impacto ambiental

O impacto ambiental dos hidretos metálicos é um fator crítico em sua avaliação econômica. Os sistemas de hidreto metálico têm as menores emissões de carbono entre as tecnologias de armazenamento de hidrogênio, tornando-os uma opção atraente para os esforços de descarbonização (Guo et al., 2023) (Zeng et al., 2024). No entanto, a produção de hidretos metálicos requer energia e recursos, que podem compensar seus benefícios ambientais se não forem gerenciados de forma sustentável. Pesquisas futuras devem se concentrar no desenvolvimento de processos de fabricação ecológicos e na melhoria da reciclagem de materiais de hidreto metálico (Dewangan et al., 2022).

CONCLUSÃO

Esta revisão evidencia o potencial significativo dos hidretos metálicos, especialmente de magnésio e magnésio-níquel, para transformação da economia energética. Os principais achados indicam: (a) competitividade técnica em aplicações específicas, com densidades energéticas superiores a sistemas convencionais; (b) viabilidade econômica demonstrada em processos de reciclagem e cadeia circular; (c) oportunidades de mercado em setores emergentes como mobilidade elétrica e armazenamento

Os desafios identificados incluem necessidade de otimização de custos produtivos, melhoria da gestão térmica e desenvolvimento de aplicações comerciais escaláveis. As perspectivas futuras apontam para integração crescente de tecnologias digitais na otimização de materiais e expansão das aplicações industriais, consolidando os hidretos metálicos como componente estratégico da transição energética global.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Programa de Pós-Graduação em Química da UFVJM. O presente trabalho foi realizado com apoio da FAPEMIG. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES).

REFERÊNCIAS

- ABDULKADIR, B. A., et al. Potential Applications of Metal-Doped Nanomaterials for Enhancing Solid-State Hydrogen Storage. *ChemistrySelect*, 2024, 9.14: e202400051.
- ADAMETZ, Patrick; MÜLLER, Karsten; ARLT, Wolfgang. Energetic evaluation of hydrogen storage in metal hydrides. *International Journal of Energy Research*, 2016, 40.13: 1820-1831.
- BAYKARA, H. et al. Comparative study of hydrogen storage and metal hydride systems: future energy storage solutions. *Processes*, v. 13, n. 5, p. 1506, 2025.
- BRUZZANO, S. et al. Hydrogen carriers: scientific limits and challenges for the supply chain, and key factors for techno-economic analysis. *Energies*, v. 16, n. 16, p. 6035, 2023.
- CHANCHETTI, L. F. et al. Prospecção tecnológica em materiais à base de magnésio para armazenamento de hidrogênio a partir de documentos de patentes. In: CONGRESSO ANUAL DA ABM, 69., 2014, São Paulo. Anais [...]. São Paulo: ABM, 2014. p. 1-12.
- DANEBERGS, Janis; DELEDDA, Stefano. Can hydrogen storage in metal hydrides be economically competitive with compressed and liquid hydrogen storage? A techno-economic perspective for the maritime sector. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2024, 50: 1040-1054.
- DEWANGAN, Sheetal Kumar, et al. A comprehensive review of the prospects for future hydrogen storage in materials-application and outstanding issues. *International Journal of Energy Research*, 2022, 46.12: 16150-16177.
- GUO, Fuqiang, et al. Efficiency-Economic-Environmental (3e) Analysis of Hydrogen as a Storage Solution in the Integrated Energy System for Decarbonizing an Industrial Area in China. Available at SSRN 4706874.
- HOSSAIN, M. S. et al. Sulphuric acid leaching of spent nickel metal hydride car batteries. *Batteries*, v. 5, n. 1, p. 126, 2022.
- KAYA, M. et al. Effects of energy storage systems on fuel economy of hybrid-electric vehicles. *International Journal of Technology Management Research*, v. 5, n. 1, p. 39-52, 2020.
- KHAN, M. A. et al. Connectionist technique estimates of hydrogen storage capacity on metal hydrides using hybrid GAPSO-LSSVM approach. *Scientific Reports*, v. 14, n. 1, p. 2086, 2024.
- LEE, H. S. et al. Trend on the recycling technologies for spent batteries by the patent and paper analysis. *Resources Recycling*, v. 21, n. 4, p. 16-25, 2012.
- MANOHARAN, Y. et al. Techno-economic analysis of hydrogen storage technologies for railway engineering: a review. *Energies*, v. 15, n. 17, p. 6467, 2019.
- MUNADI, Fachri; SUPRAMONO, Dijan. Techno-Economic Analysis Of Hydrogen Storage Technologies For Transport Applications. *Jurnal Informasi, Sains dan Teknologi*, 2024, 7.1: 01-10.
- NAZIR, G. et al. A computational investigation of lithium-based metal hydrides for advanced solid-state hydrogen storage. *ChemistrySelect*, v. 9, n. 9, p. e202304582, 2024.
- STAVILA, Vitalie, et al. Nanoconfined Metal Hydrides As Alternatives to Lithium Ion Battery Energy Storage. In: *Electrochemical Society Meeting Abstracts prime2024*. The Electrochemical Society, Inc., 2024. p. 2543-2543.
- WANG, Xinyi, et al. Technoeconomic insights into metal hydrides for stationary hydrogen storage. *Advanced Science*, 2025, 2415736.
- ZENG, J.; LIU, Xiaoyu; LIU, M.; LIU, Xi; HUANG, G.; YAO, S.; HE, G.; SHANG, N.; GUO, F.; WANG, P. Techno-Economic Analysis of Hydrogen as a Storage Solution in an Integrated Energy System for an Industrial Area in China. *Energies*, [s. l.], v. 17, n. 13, p. 3074, 2024.
- ZHANG, L. et al. Totally atom-economical synthesis of nano/micro structured nickel hydroxide realized by an Ni-O₂ fuel cell. *Green Chemistry*, v. 17, n. 5, p. 3021-3028, 2015.