

CAPÍTULO 2

HIDRETOS METÁLICOS PARA ARMAZENAMENTO DE HIDROGÊNIO: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA

João Victor Santos Macena

SENAI CIMATEC

Athus Costa Teles

SENAI CIMATEC

Inara Faria Duarte

SENAI CIMATEC

Paulo Victor Rocha Brandão

SENAI CIMATEC

Fernanda Miranda Torres Paiva

SENAI CIMATEC

Heloísa Althoff

PETROGAL

André Fonseca

GALP

Abstract: The energy transition toward renewable sources positions green hydrogen (H_2V) as a promising alternative due to its high calorific value and combustion process free of greenhouse gas emissions. This transition aligns with the geopolitical landscape and global commitments, such as the Paris Agreement and the Kyoto Protocol. With the potential to reduce greenhouse gas emissions by up to 20% by 2030,

countries committed to decarbonization are heavily investing in integrating H_2V into their energy matrices. Nevertheless, H_2V faces significant challenges in terms of competitiveness, particularly related to transportation and storage costs. Conventional storage methods, such as compression and liquefaction, are constrained by explosion risks, flammability, and high energy demands. In this context, metal hydrides have emerged as a stable and efficient alternative for hydrogen storage. Among them, $LiBH_4$ stands out for its high gravimetric capacity, while MgH_2 offers advantages due to its low cost and high availability. However, further scientific and technological advancements are essential to foster the academic and industrial maturity of this technology.

KEYWORDS: Metallic hydrides; Hydrogen storage; Hydrogen adsorption; Decarbonization; Material-based hydrogen storage.

INTRODUÇÃO

Nos últimos trinta anos, acompanhada ao aumento da demanda energética mundial, o uso dos combustíveis fósseis como principal componente da matriz energética global foi intensificado pela indústria e os fatores climáticos afetados pelo produto indesejado desta combustão foram se tornando cada vez mais significativos (ABAS; KALAIR; KHAN, 2015). Projetando o desenvolvimento dos processos industriais, o mundo se mobilizou através de tratados globais, a mitigar a emissão de gases poluentes, como o Protocolo de Kyoto em 1997 e Acordo de Paris em 2015. A partir disso, a comunidade científica se empenha em amadurecer tecnologias para produção de energia renovável. O relatório *World Energy Transitions Outlook 2024* do IRENA (*International Renewable Energy Agency*) informa que 47% da produção de energia primária do Brasil advém de fontes renováveis. Dentre as fontes renováveis, o hidrogênio se destaca pelo seu alto poder calorífico, e combustão limpa, onde o subproduto é água ao invés de gases do efeito estufa, como ocorre em fontes fósseis. Dados do IEA (*International Energy Agency*) informam que em 2021, 5% do investimento em pesquisa de energia limpa, já era comprometido pelo H₂V (KOUROUGIANNI et al., 2024).

Embora a energia do hidrogênio tenha inúmeras vantagens para a descarbonização da matriz energética, o seu armazenamento apresenta um desafio operacional que carece de métodos seguros e eficazes. Atualmente, os métodos convencionais de estocagem se baseiam no hidrogênio comprimido e no hidrogênio líquido, do inglês *compressed gas hydrogen* (CGH₂) e *liquid hydrogen* (LH₂), respectivamente. A busca por tecnologias alternativas surge dos desafios relacionados ao condicionamento do hidrogênio para atender às exigências dos métodos convencionais. No caso do CGH₂, são necessárias pressões em torno de 700 bar, que enfrenta desafios de segurança nos postos de abastecimento. Enquanto o LH₂ exige resfriamento a temperaturas criogênicas em torno de -253 °C (20 K) (ZHANG et al., 2015). Desse modo, o armazenamento de hidrogênio em materiais é estudado pela literatura visando mitigar estes desafios.

Segundo klopčič et al., 2023, os hidretos metálicos se destacam entre os materiais potenciais para o armazenamento de hidrogênio devido à sua alta capacidade gravimétrica, que é definida como a quantidade em porcentagem de hidrogênio adsorvido em relação a massa do material adsorvente. Além disso, oferecem uma elevada densidade de energia volumétrica, ou seja, a quantidade de energia de hidrogênio armazenada por metro cúbico do adsorvente. A Tabela 1 apresenta uma comparação entre os principais métodos convencionais de armazenamento de hidrogênio, como CGH₂ e LH₂, e o uso de hidretos metálicos e complexos. A análise é baseada em fatores de desempenho, incluindo capacidade gravimétrica, densidade de energia por volume, pressão e temperatura de operação.

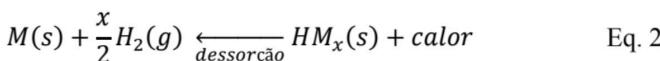
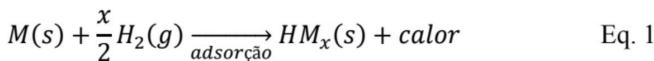
| Método de armazenamento | | Armazenamento gravimétrico (wt %) | Densidade de energia por volume (kWh/dm ³) | Pressão de operação (bar) | Temperatura de operação (K) |
|-------------------------|--------------------|-----------------------------------|--|---------------------------|-----------------------------|
| Hidrogênio comprimido | CGH ₂ | 100 | 0,8 | 350 | Ambiente |
| | | 100 | 1,3 | 700 | |
| Hidrogênio líquido | LH ₂ | 100 | 2,2 | 1 a 10 | 20 |
| | | MgH ₂ | 7,6 | 3,67 | NA |
| Hidretos metálicos | TiFe | 1,86 | 4,03 | 4,1 | 265 |
| | TiMn ₂ | 1,86 | 4,09 | 8,4 | 252 |
| | LaNi ₅ | 1,49 | 4,12 | 1,8 | 285 |
| Hidretos complexos | LiBH ₄ | 18,5 | 4,08 | NA | 573 |
| | NaAlH ₄ | 7,5 | 3,2 | NA | 473 |

Tabela 1: Capacidades de armazenamento e densidades de energia de diferentes tecnologias de armazenamento de hidrogênio e materiais de hidreto metálico.

Fonte: Klopčič et al., 2023.

Os hidretos consistem em compostos inorgânicos que possuem hidrogênio como componente mais eletronegativo. No caso dos hidretos metálicos, tecnologia em questão, o hidrogênio reage quimicamente com metais ou ligas metálicas, formando o material. O processo de armazenamento de hidrogênio nesses materiais se inicia pelo fenômeno da quimissorção da molécula de hidrogênio na superfície do metal ou liga. Essa interação química é governada por ligações fortes e pode resultar em uma liberação de energia significativa, com valores que podem atingir 100 kJ/mol, dependendo do metal ou liga envolvidos.

Ao ser adsorvido, a molécula de hidrogênio se dissocia na superfície do metal permeando na estrutura metálica, configurando o processo de absorção, sendo assim transportado (DRAWER; LANGE; KALTSCHMITT, 2024). Após o processo de adsorção e absorção do hidrogênio pelo metal ou liga metálica, a matéria prima deve ser regenerada ao seu estado de produção, que é realizado pelo processo de dessorção, onde o hidrogênio molecular é expulso da estrutura metálica. As equações, que representam as reações de adsorção e dessorção em um metal ou liga metálica, são demonstradas abaixo.



Onde *M* representa um metal, *H* o átomo de hidrogênio, *x* a quantidade de hidrogênio que o metal necessita para estabilizar energeticamente, (*g*) representa o elemento em estado gasoso e (*s*) o estado sólido. Pode-se observar que na reação direta (Eq. 1), o hidrogênio gasoso se liga exotermicamente com um metal ou liga metálica através do fenômeno de adsorção, formando o hidreto metálico (*HM_x*) em estado sólido. No processo de dessorção (Eq. 2), é necessário o fornecimento de energia para a quebra da ligação

entre o átomo de hidrogênio e a liga metálica, liberando a molécula de hidrogênio em estado gasoso (LOTOTSKYY et al., 2014). A reação inversa dificilmente ocorre de forma espontânea, já que por ser um processo endotérmico, a liga metálica tende a perder calor provocando a diminuição na taxa de dessorção, contribuindo à segurança do processo, pois num possível vazamento de hidrogênio, o impacto seria em pequena escala, sendo facilmente controlado (KUHN et al., 2018).

Os hidretos metálicos podem ser compostos por metais leves como: Lítio (Li), Boro (B), Nitrogênio (N), Sódio (Na), Magnésio (Mg), Alumínio (Al), que apresentam grande potencial de aplicações em armazenamento de hidrogênio devido às suas interessantes densidades volumétricas e capacidades gravimétricas (OYANG et al., 2020). Os tipos de hidretos irão variar conforme o grupo do metal ou liga metálica ligada, em que podem se configurar como hidretos metálicos iônicos, transicionais, intermetálicos e covalentes. Presentes na Figura 1, estão todos os tipos de metais para formação de hidretos juntamente com os elementos covalentes e ametais iônicos.

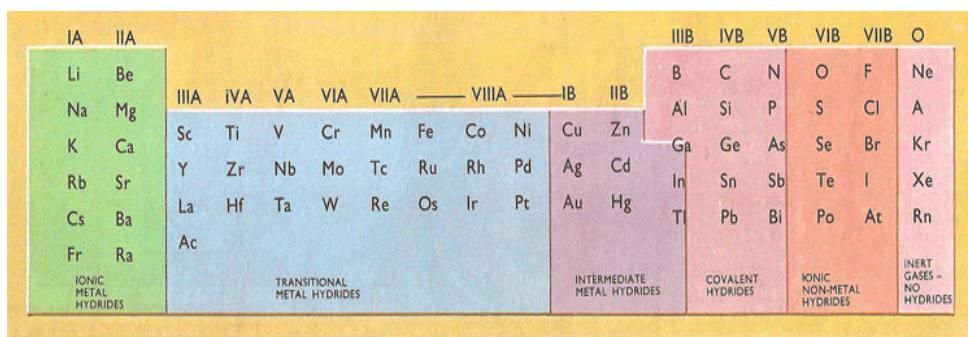


Figura 1: Diferentes classes dos hidretos metálicos

Fonte: Darling, 2024.

METODOLOGIA

Para confecção desta revisão sistemática, foi realizada a busca de artigos na literatura, com a finalidade de ambientar a estruturação do trabalho no universo das publicações científicas relacionadas ao tema proposto. A pesquisa de artigos foi realizada em duas etapas, nas plataformas Derwent Innovation e Scopus, considerando o período dos últimos 10 anos (2014 - 2024), com algumas poucas exceções devido a sua relevância. As palavras-chave utilizadas foram: “metal hydride”, “storage”, “hydrogen”. Foram acrescidos os filtros de apenas artigos em inglês (“English”) e artigos de revisão (“Review”), uma vez que o segundo consegue descrever, com uma maior abrangência, os principais hidretos para o armazenamento de hidrogênio. Os resultados foram organizados com base na relevância determinada pela própria plataforma. Dentro desta lista, os artigos que mais representavam o projeto foram utilizados como base para a construção do estado da arte do tema em questão.

RESULTADOS

Propriedades termodinâmicas da adsorção e dessorção do hidrogênio

No processo de formação do hidreto metálico, a cinética de adsorção é influenciada por fatores que podem determinar a sua eficiência, como: temperatura, pressão parcial do hidrogênio, morfologia da superfície e condutividade térmica. A temperatura auxilia a adsorção inicial do hidrogênio já que o sistema precisa fornecer a energia de ativação para completar as reações, porém temperaturas muito altas podem fornecer energia cinética suficiente para as moléculas adsorvidas se desprenderem da superfície (dessorção) (LOTOTSKYY et al., 2014).

O processo de dessorção se resume no desprendimento das moléculas da superfície do adsorvente, onde no caso, a ligação do hidreto metálico é quebrada e revertida em hidrogênio e o metal ou liga metálica é regenerado(a). Os fatores que influenciam o processo de dessorção são similares aos de adsorção, como: temperatura, pressão e condutividade térmica. O processo de dessorção é favorecido pelo aumento do grau de liberdade das moléculas, que pode ser contemplado pelo aumento da temperatura ou diminuição da pressão (LOTOTSKYY et al., 2014).

Para descrição concisa do fenômeno, o autor utilizou os modelos de Avrami-Erofeev representando o processo de adsorção e de Arrhenius representando o processo de dessorção, em que são apresentados pelas equações 1 e 2:

$$X = 1 - \exp[-(K_r t)^n] \quad \text{Eq. 3}$$

Onde, X é a fração reagida, K_r é a constante, t representa o tempo, e n é valor inteiro ou não a depender do mecanismo de reação.

$$K_r = K(P) \cdot K_0 \exp\left(-\frac{Ea}{RT}\right) \quad \text{Eq. 4}$$

Onde, Ea é a energia de ativação e $K(P)$ a força motriz, R é a constante dos gases perfeitos e T é a temperatura. Pode-se observar que $K(P)$ depende da variação da pressão real do hidrogênio em relação ao equilíbrio, e as taxas de reação nas condições pressão-temperatura dependerão dos parâmetros cinéticos e das características de pressão-composição-temperatura (PCT) do sistema hidrogênio-metal.

Principais grupos de hidretos metálicos

Os principais grupos de hidretos metálicos apresentam características e propriedades únicas, que podem ser analisadas individualmente para identificar aqueles hidretos com maior potencial no armazenamento e transporte de hidrogênio. Cada grupo possui qualidades distintas, o que torna o estudo desses produtos essenciais para avanços na área, considerando suas vantagens e desafios específicos. Os hidretos metálicos de forma química simples são conhecidos como hidretos elementares. A forma simples supracitada

é quando o hidrogênio faz uma ligação com apenas um elemento, como: Magnésio (Mg), Alumínio (Al), Titânio (Ti) e etc (DRAWER; LANGE; KALTSCHMITT, 2024). O primeiro, apesar da alta capacidade de armazenamento de hidrogênio, disponibilidade e baixo custo, o hidreto de magnésio apresenta elevada entalpia de reação (75) envolvida nos processos de adsorção e de dessorção. Essa característica requer temperaturas de operação em torno de 300 °C, trazendo um desafio no seu uso para carreamento. No entanto, é parcialmente compensado devido a sua estabilidade de ciclo (DRAWER; LANGE; KALTSCHMITT, 2024).

Em contraste ao hidreto de magnésio, o hidreto elementar de alumínio (AlH_2) apresenta uma entalpia de reação relativamente baixa (7 kJ/mol_{H_2}) que requer uma temperatura de 100° C de operação. Possui também uma alta capacidade de armazenamento de hidrogênio, em torno de 10,1% de hidrogênio em peso de adsorvente (ANDERSSON; GRÖNKVIST, 2019). O que o torna menos viável do que o MgH_2 para o objetivo em questão é que são necessárias pressões muito altas para o carregamento, possuindo difícil reversibilidade, ou seja, a recuperação cíclica do hidreto só acontece por processos eletroquímicos (ANDERSSON; GRÖNKVIST, 2019). Já o hidreto de titânio (TiH_2) destoa dos demais apresentados. Possui entalpia superior à do hidreto de magnésio ($>100 kJ/mol_{H_2}$) e temperaturas de operação na casa dos 700°C em baixas pressões. No entanto, essa alta temperatura de operação não é compensada por uma capacidade de armazenamento significativa, apresentando uma capacidade de cerca de 1% de hidrogênio em peso de adsorvente, ou seja, armazena dez vezes menos hidrogênio do que o principal concorrente também do grupo elementar.

Os hidretos intermetálicos são formados pela combinação do hidrogênio com ligas metálicas, tendo uma estrutura molecular correspondente à $A_xB_yH_z$, onde o metal A se liga ao hidrogênio fortemente e o metal B fracamente (DRAWER; LANGE; KALTSCHMITT, 2024). Comparado aos demais tipos de hidretos metálicos, o armazenamento de hidrogênio em um intermetálico pode ser realizado em condições operacionais mais baixas, como menores temperaturas e pressões, porém apresentam uma capacidade de armazenamento de hidrogênio inferior a 2% de hidrogênio em peso de adsorvente (TARASOV et al., 2021). Dentre os compostos intermetálicos capacitados à formação de hidretos, as ligas metálicas de lantânio-níquel ($LaNi_5$) e ferro-titânio ($FeTi$) demonstraram potencial de armazenamento de hidrogênio, em que foi possível realizar a adsorção em temperaturas e pressões de 100°C e 50 bar respectivamente (SAKINTUNA; LAMARI-DARKRIM; HIRSCHER, 2007). No entanto, a pequena capacidade de armazenamento hidrogênio (até 1,9% em peso) se torna um grande desafio à viabilidade e implementação do hidreto em processos reais.

Portanto, apesar dos grandes esforços da literatura visando a otimização do armazenamento de hidrogênio utilizando hidretos intermetálicos, as limitações de transporte devido à baixa quantidade de armazenamento de hidrogênio por peso (capacidade gravimétrica), baixa cinética e procedimento de ativação complicado, torna desafiador o uso viável do hidreto intermetálico neste processo (RUSMAN; DAHARI, 2016).

O último grupo dos hidretos metálicos são caracterizados por terem um hidrogênio ligado a um ânion complexo somados a um metal leve, por isso são conhecidos como o grupo hidretos metálicos complexos (DRAWER; LANGE; KALTSCHEIMM, 2024). Os ânions complexos são elementos químicos covalentes ligados ao hidrogênio. Dentre eles, se destacam o hidreto de alumínio (AlH_4), hidreto de boro (BH_4) e Aminas (NH_2), já para os metais leves, destacam-se o lítio (Li) e o sódio (Na) devido as baixas entalpias de formação (DRAWER; LANGE; KALTSCHEIMM, 2024).

Os hidretos metálicos complexos se destacam por terem a maior capacidade gravimétrica de todos os demais tipos de hidretos metálicos supracitados (KLOPČIČ et al., 2023). A grande maioria deste grupo são hidretos metálicos de altas temperaturas que se aproximam dos 300 °C devido as fortes ligações químicas que apresentam (KLOPČIČ et al., 2023). O boro hidreto de lítio (LiBH_4) e o hidreto de alumínio e lítio (LiAlH_4) apresentam as maiores capacidades gravimétricas deste grupo superando também diversos hidretos de outras classes (RAMPAI et al., 2024).

Devido as distintas composições moleculares dos hidretos metálicos é esperado que os diferentes tipos de hidretos tenham capacidades de armazenamento e cinéticas de adsorção e dessorção de hidrogênio diferentes (BISHNOI; PATI; SHARMA, 2024). Os diversos tipos de hidretos discutidos e suas principais propriedades podem ser visualizados na Tabela 2.

| Tipos de hidretos à base de metais | Fórmula | Capacidade Gravimétrica (%wt) | Densidade Volumétrica (g/l) | Temperatura de dessorção (°C) | Custo (€/kg) |
|------------------------------------|---|-------------------------------|-----------------------------|-------------------------------|--------------|
| Hidretos Elementares | LiH | 7,7 | 150 | 910 | 3196 |
| | AlH_3 | 10,1 | 84 | 99 (2.5 GPa) | 52.3 |
| | MgH_2 | 7,69 | 84 | 400 | 2.7 |
| Hidretos metálicos intermetálicos | FeTiH_2 | 1.9 | 88 | 40 | 7–7.4 (FeTi) |
| | LaNi_5H_6 | 1.40 | 120 | 106 | 1220 (LaNi5) |
| | NaAlH_4 | 3.99 | 53 | 150-200 | 18.7 |
| Hidretos de ligas metálicas | Mg_2FeH_6 | 5.5 | 120 | 350 | 2 |
| | Mg_2NiH_4 | 3.60 | 95 | 290 | N/M |
| | LiAlH_4 | 7.9 | 46 | 180 | |
| Hidretos Complexos | NaAlH_4 | 5.6 | 46 | 210 | |
| | LiBH_4 | 13.5 | 59 | 400 | N/M |
| | $\text{LiNH}_2 - \text{LiH}$ | 5.5 | 105 | 200 | |
| | $\text{Mg}(\text{NH}_2)_2 - \text{LiH}$ | 5.6 | 120 | 160 | |

Tabela 2: Principais características de cada classe de hidreto metálico

* N/M = Não mencionado.

Fonte: Mehr et al., 2024.

Através da Tabela 2.

Tabela 2, é possível avaliar os custos financeiros dos hidretos, que variam conforme a natureza do metal ou liga metálica. O metal alcalino-terroso magnésio (Mg) se faz promissor na sua formação de hidretos devido a sua alta capacidade de armazenamento de hidrogênio que corresponde a 7,7% em peso do adsorvente. Somada a sua capacidade de armazenamento, este elemento se caracteriza pela alta disponibilidade e pelo baixo custo (2,7 €/kg), o que naturalmente o torna uma escolha popular (BISHNOI; PATI; SHARMA, 2024). Já no caso do hidreto complexo LiBH_4 , ele se destaca por ter a maior capacidade gravimétrica dentre todos os hidretos de todas as classes, sendo de 13,5% em peso a sua capacidade de armazenamento de hidrogênio. Por essa razão, ele tem sido alvo de diversas pesquisas científicas (RAMPAI et al., 2024).

Principais hidretos metálicos para adsorção do hidrogênio

No quadro das classes de hidretos metálicos apresentado por Mehr et al., 2024, pode-se observar que apesar de alguns hidretos metálicos de diferentes classes apresentarem boa capacidade gravimétrica e densidade volumétrica, possuem barreiras operacionais como altas temperaturas, pressões e custos que os tornam menos interessantes ao objetivo proposto. Após levantamento bibliográfico produzido por (DRAWER; LANGE; KALTSCHMITT, 2024), o autor seleciona os hidretos metálicos mais estudados de cada classe dentro do objetivo proposto, que pode ser visualizado na Tabela 3.

| Hidreto Metálico | Classe | Faixa de Temperatura de Operação [°C] | Densidade Volumétrica [kgH ₂ /m ³] | Capacidade de Armazenamento [wt%] | Taxa de Carga [kgH ₂ /min] |
|--------------------|---------------|---------------------------------------|---|-----------------------------------|---------------------------------------|
| LaNi ₅ | Intermetálico | 20–80 | 106 | 1.3 | <1.0 |
| TiFe | Intermetálico | 30–70 | 98 | 1.5 | <1.0 |
| LiBH ₄ | Complexo | 460–1000 | 91 | 13.4 | <1.0 |
| NaAlH ₄ | Complexo | 100–200 | 47 | 3.7 | 0.5 |
| TiH ₂ | Elementar | 650–750 | 39 | 1.0 | <1.0 |
| Mg _H 2 | Elementar | 250–500 | 80 | 5.5 | <1.0 |

Tabela 3: Principais hidretos metálicos de cada grupo

Fonte: Drawer; Lange; Kaltschmitt, 2024

Analisando a Tabela 3, observa-se que é possível delimitar os melhores hidretos para o objetivo de armazenamento e transporte de hidrogênio. Ao analisar grupo a grupo, percebe-se que o principal desafio dos hidretos intermetálicos é a baixa capacidade gravimétrica. Embora esses hidretos ofereçam alta densidade de energia volumétrica e uma baixa temperatura de operação, eles conseguem armazenar menos de 2% de hidrogênio em peso do adsorvente, o que os torna menos competitivos quando comparados a hidretos de outras classes.

Dentre os hidretos complexos, é visto que apesar do boro hidreto de lítio (LiBH_4) necessitar de maiores temperaturas de operação, ele se sobressai sobre o alanato de sódio (NaAlH_4) por apresentar quase o dobro da densidade volumétrica e três vezes mais capacidade gravimétrica de hidrogênio em comparativo, o tornando uma opção mais atraente.

Na análise dos hidretos elementares, o hidreto de magnésio (MgH_2) se sobressai por apresentar o dobro da densidade volumétrica e uma capacidade gravimétrica cinco vezes maior em relação ao hidreto de titânio (TiH_2), além de operar em temperaturas inferiores que geram menores custos. Estes são os que apresentam a maior disparidade comparativa.

O baixo custo do magnésio fornecido por Mehr et al., 2024 somado as diferentes metodologias de fabricação disponíveis, fazem com que a produção em larga escala do magnésio seja possível. A alta capacidade gravimétrica e densidade de energia volumétrica do hidreto de magnésio trazem uma vantagem econômica quando comparado aos hidretos intersticiais (KLOPČIČ et al., 2023). Quanto às desvantagens, é possível reforçar como descrito por Klopčič et al., 2023 e Mehr et al., 2024, a alta entalpia de reação e altas temperaturas de operação. Para as aplicações estacionárias, conectar o armazenamento de hidrogênio baseado em hidreto de magnésio com células de combustível de alta temperatura é uma opção viável (KLOPČIČ et al., 2023). Além do descrito, outros cenários de aplicação são quando a energia térmica residual a um nível de temperatura elevado ou excesso de energia elétrica possa ser aproveitado para realizar um aquecimento, sendo o preço desta energia somado ao baixo preço do metal magnésio tenha um custo menor do que um hidreto de baixa temperatura e capacidade gravimétrica. A tecnológica descrita da utilização do hidreto de magnésio (MgH_2) aplicada em instalações industriais, onde o elemento hidrogênio possa ser aplicado em processos químicos, cumpre todos os pressupostos anteriormente citados (KLOPČIČ et al., 2023).

Conforme já comentado anteriormente, o boro hidreto de lítio (LiBH_4), nos estudos teóricos, é o material com a maior densidade de energia gravimétrica dentre os hidretos e, portanto, é um alvo de diversos grupos pesquisa. Quanto as desvantagens, segundo Mehr et al., 2024, o custo do lítio é alto devido a sua produção cara e o alto consumo deste elemento em baterias. As altas temperaturas e entalpias de reação apresentam desafios semelhantes aos apresentados no hidreto de magnésio (MEHR et al., 2024). A reversibilidade deste material também é considerada baixa. Mas os benefícios potenciais devido as suas características de alta capacidade de armazenamento de hidrogênio para aplicações móveis, fundamenta os estudos para produções mais econômicas para melhorar a reversibilidade e parâmetros de operação (DING et al., 2020).

CONCLUSÃO

Observou-se que o hidreto de magnésio (MgH_2) se destaca como promissor devido ao seu baixo custo, além de apresentar alta capacidade gravimétrica e densidade volumétrica. Por outro lado, o borohidreto de lítio ($LiBH_4$) se sobressai por oferecer a maior capacidade gravimétrica entre todos os hidretos metálicos, além de também figurar entre as maiores densidades volumétricas dos demais hidretos. Em suma, o potencial de armazenamento de hidrogênio através de hidretos metálicos gera alto interesse à indústria de energia, de modo que são realizados muitos estudos para encontrar materiais com baixas temperaturas de operação, altas densidades de armazenamento de hidrogênio gravimétrica e volumétrica, capacidade reversível, cinética rápida, estabilidade térmica e boa resistência à oxidação.

Por fim, o método de armazenamento por hidretos metálicos foi bem explorado através do estado da arte realizado a partir da análise técnica e acadêmica, em que foram evidenciados os hidretos mais promissores para o objetivo de transporte de hidrogênio, sendo possível destacar o boro hidreto de lítio ($LiBH_4$) e o hidreto de magnésio (MgH_2). Ambos oferecem um equilíbrio favorável entre a capacidade de armazenamento de hidrogênio e densidade energética, apesar de enfrentarem desafios específicos, como a temperatura de operação (no caso do $LiBH_4$). O hidreto de magnésio (MgH_2), em particular, apresenta uma combinação vantajosa de alta densidade volumétrica de energia e temperaturas operacionais mais baixas, o que o torna uma escolha altamente competitiva, apesar de apresentar menor capacidade gravimétrica comparado ao $LiBH_4$. Em conjunto, essas duas opções representam os materiais com maior potencial para viabilizar o armazenamento e transporte eficiente de hidrogênio, atendendo às demandas de densidade energética e eficiência de operação.

REFERÊNCIAS

- ANDERSSON, Joakim; GRÖNKVIST, Stefan. Large-scale storage of hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 44, n. 23, p. 11901-11919, 2019.
- DING, Zhao et al. LiBH4 for hydrogen storage-new perspectives. *Nano Materials Science*, v. 2, n. 2, p. 109-119, 2020.
- DRAWER, Chris; LANGE, Jelto; KALTSCHMITT, Martin. Metal hydrides for hydrogen storage—Identification and evaluation of stationary and transportation applications. *Journal of Energy Storage*, v. 77, p. 109988, 2024.
- KLOPČIČ, Nejc et al. A review on metal hydride materials for hydrogen storage. *Journal of Energy Storage*, v. 72, p. 108456, 2023.
- KUHN, Vinicius Nizolli et al. Aumento da eficiência total de armazenadores de energia compostos por eletrolisadores, células a combustível e hidretos metálicos. 2018. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Santa Maria.

LOTOTSKYY, Mykhaylo V. et al. Metal hydride hydrogen compressors: a review. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 39, n. 11, p. 5818-5851, 2014.

OLIVEIRA, Alyson Celson Medeiros de. Armazenamento de hidrogênio em paládio e hidretos metálicos. 2018.

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

RAMPAI, M. M. et al. Hydrogen production, storage, and transportation: recent advances. *RSC Advances*, v. 14, n. 10, p. 6699-6718, 2024.

RUSMAN, N. A. A.; DAHARI, M. A review on the current progress of metal hydrides material for solid-state hydrogen storage applications. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 41, n. 28, p. 12108-12126, 2016.

SAKINTUNA, Billur; LAMARI-DARKRIM, Farida; HIRSCHER, Michael. Metal hydride materials for solid hydrogen storage: a review. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 32, n. 9, p. 1121-1140, 2007.

TARASOV, Boris P. et al. Metal hydride hydrogen storage and compression systems for energy storage technologies. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 46, n. 25, p. 13647-13657, 2021.

ZHANG, Yang-huan et al. Development and application of hydrogen storage. *Journal of Iron and Steel Research International*, v. 22, n. 9, p. 757-770, 2015.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), da empresa Petrogal Brasil S.A e do SENAI CIMATEC, fundamentais para a realização deste trabalho.