



Comparativo entre o uso de baterias e hidrogênio para armazenamento de energia

Palavras-Chave: HIDROGÊNIO-VERDE, BATERIAS, ENERGIA RENOVÁVEL

Autores(as):

ERIC ABDALA KALANDJIAN, FECFAU – UNICAMP

Prof^(a). Dr^(a). VINÍCIUS DE CARVALHO NEIVA PINHEIRO (orientador), FECFAU - UNICAMP

INTRODUÇÃO:

Com o avanço das mudanças climáticas e a crescente demanda por fontes energéticas mais limpas e sustentáveis, as tecnologias de energias renováveis tornaram-se centrais na busca por um modelo energético viável para o futuro. A substituição gradual dos combustíveis fósseis por alternativas menos poluentes é um dos principais desafios da atualidade, exigindo inovações que possibilitem a geração, o uso e o armazenamento eficiente da energia. Nesse contexto, o hidrogênio desponta como um dos vetores energéticos mais promissores, devido à sua versatilidade, alta densidade energética e potencial de integração com fontes renováveis, como a solar e a eólica. Considerado um pilar importante na transição energética, o hidrogênio é alvo de elevado estudo tanto na pesquisa quanto na indústria. No entanto, é fundamental avaliar cuidadosamente sua viabilidade como substituto de tecnologias já consolidadas, como as baterias, levando em conta fatores como eficiência, segurança, custo e maturidade tecnológica.

METODOLOGIA:

Primeiramente, por meio de uma revisão bibliográfica focada em artigos científicos, foi possível aprofundar o entendimento tanto sobre as tecnologias de armazenamento em baterias, quanto sobre o uso do hidrogênio, abordando seus princípios de operação, aplicações práticas e impactos no setor energético. A análise permitiu examinar as principais características, benefícios e limitações de cada solução, evidenciando o papel essencial das baterias na estocagem de energia e o potencial do hidrogênio como uma alternativa sustentável para o futuro energético. Dessa forma, a pesquisa proporcionou uma compreensão mais abrangente sobre essas tecnologias e suas possíveis contribuições em diferentes contextos, permitindo a análise de seu papel em setores variados da sociedade.

Esse aprofundamento inicial serviu como base para, em etapas posteriores, realizar comparações estruturadas entre o hidrogênio e as baterias em alguns setores, como aplicações

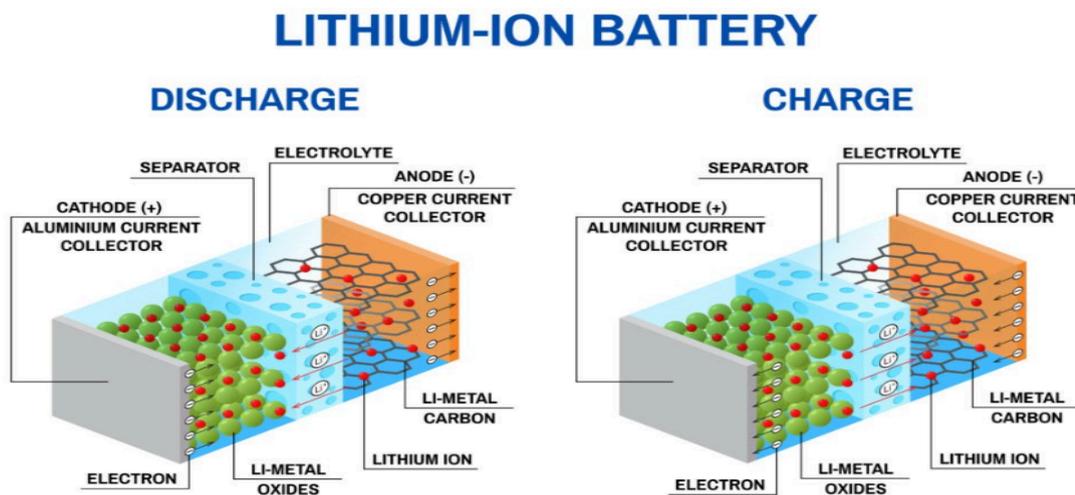
residenciais, veículos automotivos e uso industrial. Além disso, foram considerados aspectos fundamentais para a avaliação de viabilidade, como os custos envolvidos, a densidade energética oferecida por cada tecnologia, a segurança associada ao seu uso, os impactos ambientais ao longo de seu ciclo de vida e o grau de maturidade tecnológica para implementação em larga escala.

RESULTADOS E DISCUSSÃO:

Para estudo prévio sobre as baterias, primeiramente, foi realizado um estudo sobre as baterias de íon-lítio focado em seu funcionamento, composição, materiais e no processo de carga e descarga. Assim, foi estudado o interior das baterias, as quais baseiam-se na conversão de energia química em elétrica por meio de reações de oxirredução em um sistema eletroquímico formado por ânodo, cátodo, eletrólito, separador, o qual evita curto-circuitos ao impedir o contato direto entre ânodo e cátodo e uma conexão externa, por onde fluem os elétrons. No ânodo, os elétrons são liberados, enquanto no cátodo são recebidos (Romão et al., 2019).

Nas baterias de lítio, comuns em celulares e automóveis, utiliza-se carbono como ânodo, óxido de lítio-cobalto (LiCoO_2) como cátodo e um eletrólito com sais de lítio, permitindo sua recarga. Durante a descarga, a energia química é convertida em elétrica, e na recarga, as reações se invertem. O ânodo não é consumido completamente, mas armazena íons, fator essencial nos ciclos de carga e descarga. Durante a descarga, ocorre a movimentação dos íons do ânodo para o cátodo, enquanto, para a recarga, ocorre o processo contrário para que o material seja restaurado para uma nova descarga através da aplicação de uma tensão como em tomadas para celulares.

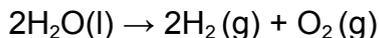
Figura 1: Ilustração de carga e descarga e uma bateria de íon-lítio



Fonte: Progress in electrode and electrolyte materials: path to all-solid-state Li-ion batteries (Sharma et al., 2022)

Posteriormente, para o estudo prévio da energia armazenada por hidrogênio foram estudados o método de obtenção do hidrogênio e, neste resumo, um método para geração de energia, como a Proton Exchange Membrane Fuel Cells (PEMFCs). O hidrogênio pode ser obtido por meio do processo de eletrólise, que utiliza uma corrente elétrica para separar a água em hidrogênio (H_2) e oxigênio (O_2)

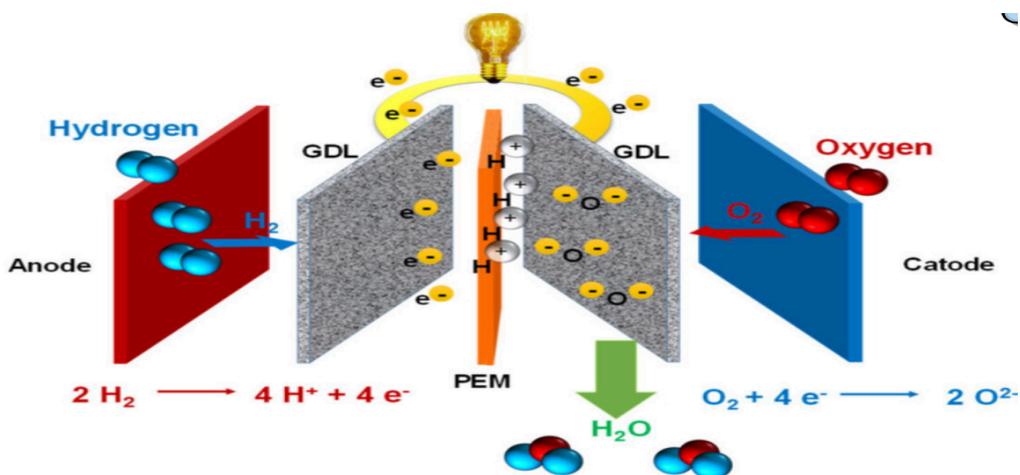
puros. Para que isso ocorra, é necessário o uso de uma célula eletrolítica composta por dois eletrodos: o ânodo (polo positivo, o qual transfere elétrons) e o cátodo (polo negativo, o qual os recebe), ambos imersos em uma solução eletrolítica, como o hidróxido de sódio. Assim, a obtenção do hidrogênio pode ser resumida de acordo com a seguinte reação global:



Entretanto, o processo de eletrólise da água requer uma quantidade significativa de energia elétrica para ocorrer de forma eficiente. Para que esse processo seja considerado realmente sustentável e ambientalmente limpo em todas as etapas de geração, é fundamental que energias renováveis sejam utilizadas como fonte para eletrólise da água, como a energia solar, a eólica ou a hidrelétrica. Caso contrário, a produção de hidrogênio acabaria dependendo da queima de combustíveis fósseis, o que comprometeria seu potencial como vetor energético de baixo impacto ambiental. (Oliveira et al., 2024)

Para entender a viabilidade em transformar a energia armazenada em forma de hidrogênio em energia elétrica para edifícios, automóveis, etc. foi estudado o funcionamento da célula a combustível de membrana de troca de prótons (PEMFCs).

Figura 2: Diagrama esquemático mostrando os componentes de um único PEMFC: ânodo, cátodo, GDL (camada de difusão de gás), membrana, ânodo e cátodo, reações conjuntas e produtos.



Fonte: “Proton Exchange Membrane Fuel Cells (PEMFCs): Advances and Challenges” (Tellez-Cruz et al., 2021)

Resumidamente, no ânodo ocorre a dissociação do gás hidrogênio em elétrons (e^-) e prótons (H^+). Os prótons atravessam a membrana de troca de prótons e, ao chegarem ao cátodo, reagem com o oxigênio dissociado, formando moléculas de água. Os elétrons, por sua vez, não conseguem atravessar a membrana e são conduzidos por um circuito externo, gerando energia elétrica. Além disso, há a presença da camada de difusão de gás (GDL), responsável por assegurar que o hidrogênio e o oxigênio sejam distribuídos de maneira uniforme sobre os eletrodos, favorecendo a eficiência do processo. (Tellez-Cruz et al., 2021)

Após garantir maior conhecimento e melhor base sobre as tecnologias, foi iniciada a revisão bibliográfica para realizar os paralelos entre os objetos de estudo. Neste resumo, pela limitação de páginas, será revisto um dos casos a serem estudados (“Standalone electricity supply system with solar hydrogen and fuel cell: Possible to get rid of storage batteries?” publicado em 2025), o qual está baseado na comparação de custos e eficiência entre a energia advinda de painéis solares armazenada em baterias e em hidrogênio para abastecimento de um edifício de 14 andares no Níger, país do continente africano. Para que o comparativo fosse possível, alguns fatores foram previamente definidos, como a quantidade de eletrodomésticos presente em cada andar, como televisores, refrigeradores, aparelhos de ar-condicionado, etc., o período de uso dos aparelhos (6h até 21h para aparelhos comuns, ininterruptamente para refrigeradores e das 21h até 6h para lâmpadas externas) e a potência do painel solar de 150kW para ambos os cenários. Após o estabelecimento de uma demanda a partir de cálculos utilizando fatores de coincidência de uso, foi estipulado uma potência de pico 150KW, uma vez que a média obtida com dados de radiação e demanda foi de 140KW. Para dimensionamento do eletrolisador (usado apenas quando há excedente), foram analisados os valores médios de excedentes, o qual resultou de 50kW, e, para a célula de combustível (utilizada quando há necessidade durante o dia), uma potência de 20KW, baseado no déficit horário ao longo de um ano. Além disso, foi projetada uma bateria de 5kWh para cobrir as cargas noturnas e um tanque de armazenamento de 50kg para o hidrogênio produzido pelo eletrolisador para reter o hidrogênio não usado pela célula de combustível. A partir deste sistema, seria garantido o fornecimento de energia para o edifício ininterruptamente.

Para o sistema de baterias, segundo objeto de estudo, foram utilizados parâmetros como a eficiência do sistema de baterias (90%) e a profundidade de descarga de bateria (DOD) de 80%. Dessa forma, a partir de um valor máximo da demanda acumulada de horas de déficit consecutivas de 369kWh foi obtido um valor de 513kWh para a capacidade de armazenamento do conjunto de bateria. Da mesma forma em relação à célula a combustível, a bateria começará a liberar energia a partir do momento em que for detectado necessidade, ou seja, déficit da energia primeiramente gerada pelos painéis solares.

Após o estabelecimento de todas as potências dos componentes de cada cenário, foi realizada uma análise econômica baseada, principalmente, em três parâmetros de custo: custo nivelado da eletricidade LCOE (valor necessário para gerar 1 kWh de eletricidade), custo nivelado do hidrogênio (valor necessário para produzir um quilograma de hidrogênio) LCOH e custo nivelado do armazenamento LCOS (vida útil do sistema e relação ao total de energia elétrica oferecido). Para o LCOH, dois outros cenários foram considerados: o uso do próprio sistema de painéis solares (LCOH₁) ou a compra de energia elétrica (LCOH₂) para ativação do eletrolisador.

Para o LCOE, foi verificado um valor menor para o sistema de armazenamento por hidrogênio de 0,12€/kg, enquanto para o sistema de baterias apresentou um LCOE de 0,17€/kg. Além disso, o LCOS do sistema composto pelo hidrogênio também foi menor em relação à bateria, 0,35€/kWh e 0,71€/kWh, respectivamente. Para as possibilidades em relação à fonte de energia para o eletrolisador,

foi verificado um custo de 8,21€/Kg para o uso dos próprios painéis solares e 4,78€/kg para LCOH₁ e LCOH₂, respectivamente. (Bhandari et al., 2025)

CONCLUSÕES:

Diante da análise comparativa entre o uso de baterias e do hidrogênio como alternativas para o armazenamento de energia, é possível observar que o hidrogênio apresenta valores promissores em termos de eficiência e custos. No entanto, é essencial destacar que a escolha entre uma ou outra solução não deve se basear apenas em desempenho energético ou preços, mas também deve levar em consideração aspectos críticos como a segurança no armazenamento do hidrogênio, que envolve riscos de inflamabilidade e vazamento, bem como os impactos econômicos e ambientais decorrentes de uma substituição ampla das baterias atualmente utilizadas, tendo em vista que o descarte de baterias possui cuidados específicos e necessários pela sua composição química.

BIBLIOGRAFIA

- TELLEZ-CRUZ, M. M. et al. **Proton Exchange Membrane Fuel Cells (PEMFCs): Advances and Challenges**. Disponível em: <<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8468942/#sec2-polymers-13-03064>>. Acesso em 17 de nov. 2024.
- JUNIOR; CARVALHO, A. D.; ULISSES GALVÃO ROMÃO. **BATERIAS DE ÍON DE LÍTIO ESTADO DA ARTE E APLICAÇÕES**. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/339209159_BATERIAS_DE_ION_DE_LITIO_ESTADO_DA_ARTE_E_APLICACOES>. Acesso em 15 nov. 2024.
- J, Z. L. **State of the Art Development on Solid-State Lithium Batteries**. Disponível em: <<https://arxiv.org/abs/2307.03620>>. Acesso em 18 dez. 2024.
- NETO, R.; ROBERTO, J.; MOREIRA, S. **GERAÇÃO E COMBUSTÃO DO HIDROGÊNIO OBTIDO ATRAVÉS DO PROCESSO DE ELETRÓLISE DA ÁGUA**. Disponível em: <http://sites.poli.usp.br/d/pme2600/2007/Artigos/Art_TCC_018_2007.pdf>. Acesso em: 20 jan. 2025.
- SHARMA, S. K. et al. **Progress in electrode and electrolyte materials: path to all-solid-state Li-ion batteries**. v. 1, n. 8, p. 457–510, 1 jan. 2022. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/361416564_Progress_in_Electrode_and_Electrolyte_Materials_Path_to_All-solid-state_Li-ion_Batteries>. Acesso em: 5 jan. 2025.
- BHANDARI, R. **Standalone electricity supply system with solar hydrogen and fuel cell: Possible to get rid of storage batteries?** International Journal of Hydrogen Energy, 1 ago. 2024. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319924031872#tbl3>> Acesso em 2 jul. 2025.
- GRACIA, L. et al. **Use of Hydrogen in Off-Grid Locations, a Techno-Economic Assessment**. Energies, v. 11, n. 11, p. 3141, 13 nov. 2018. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1996-1073/11/11/3141#:~:text=sources%29%20,work%20under%20variable%20renewable%20inputs>> Acesso em: 3 jul. 2025.