

## 15º Congresso de Inovação, Ciência e Tecnologia do IFSP - 2024

### DESENVOLVIMENTO DE KIT DIDÁTICO DE BAIXO CUSTO DE PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO VERDE EM PEQUENA ESCALA

GUSTAVO M. AMARAL<sup>1</sup>, MARCELO K. SHIBUYA<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Graduando em Bacharelado em Engenharia de Controle e Automação, Bolsista PIBIFSP, IFSP, Campus Guarulhos, amaral.gustavo@aluno.ifsp.edu.br.

<sup>2</sup> Professor Doutor e pesquisador sobre Eficiência Energética e Geração de Energia Elétrica com base na tecnologia fotovoltaica, IFSP, Campus Guarulhos, marcelo.shibuya@ifsp.edu.br.

Área de conhecimento (Tabela CNPq): 1.03.03.04-9 Sistemas de Informação

**RESUMO:** Com o avanço tecnológico e o crescente consumo energético global, o hidrogênio verde está sendo cada vez mais considerado uma solução para descarbonizar setores econômicos chave. Classificado como o tipo de hidrogênio mais limpo, ele é produzido por eletrólise da água utilizando energia renovável, sem emissões de CO<sub>2</sub>. Este artigo discute o desenvolvimento de um kit didático de baixo custo para produção de hidrogênio verde em pequena escala, uma solução promissora frente às mudanças climáticas e à busca por alternativas energéticas. Utilizando um hidrolisador PEM, garrafas PET e outros materiais acessíveis, o estudo atende à demanda por equipamentos educacionais acessíveis em instituições de ensino. Resultados experimentais indicaram que, embora a produção de hidrogênio aumente com a potência, a eficiência energética diminui exponencialmente, refletindo as limitações do sistema. O projeto ainda requer melhorias, como a substituição das garrafas PET por recipientes de acrílico para otimizar a operação e a coleta de dados, além da conexão do hidrolisador a um módulo fotovoltaico. Mesmo assim, o kit já está funcional e pode ser aprimorado para aumentar a eficiência na produção de hidrogênio.

**PALAVRAS-CHAVE:** Hidrogênio Verde; Hidrolisador PEM; Kit Didático.

### DEVELOPMENT OF A TEACHING KIT FOR SMALL-SCALE GREEN HYDROGEN PRODUCTION

**ABSTRACT:** With technological advancement and increasing global energy consumption, green hydrogen is increasingly being considered as a solution to decarbonize key economic sectors. Classified as the cleanest type of hydrogen, it is produced by electrolysis of water using renewable energy, without CO<sub>2</sub> emissions. This article discusses the development of a low-cost educational kit for small-scale green hydrogen production, a promising solution to climate change and the search for energy alternatives. Using a PEM hydrolyzer, PET bottles, and other affordable materials, the study meets the demand for affordable educational equipment in educational institutions. Experimental results indicated that, although hydrogen production increases with power, energy efficiency decreases exponentially, reflecting the limitations of the system. The project still requires improvements, such as replacing PET bottles with acrylic containers to optimize operation and data collection, in addition to connecting the hydrolyzer to a photovoltaic module. Even so, the kit is already functional and can be improved to increase hydrogen production efficiency.

**KEYWORDS:** Green Hydrogen; PEM Hydrolyzer; Didactic Kit.

## INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, o debate em torno das alternativas energéticas tem se intensificado em resposta aos desafios impostos pelas mudanças climáticas, pelo aumento do consumo energético, pelo crescimento populacional e pelos avanços tecnológicos, conforme discutido por Hassan et al. (2024) e Abdulateef et al. (2023). Nesse contexto, o hidrogênio verde emergiu como uma solução promissora, capaz de desempenhar um papel fundamental na descarbonização de setores-chave da economia, como transporte, indústria e geração de energia, oferecendo uma solução de armazenamento energético tanto para curto quanto para longo prazo, segundo Kaya et al. (2020) e Squadrito et al. (2023).

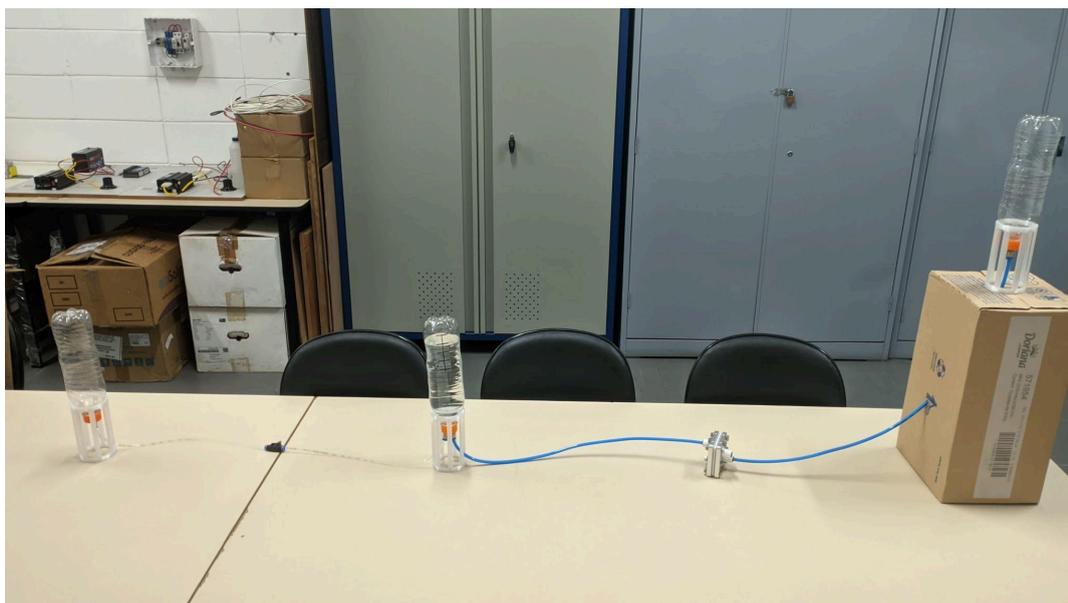
Além disso, segundo Garlet et al. (2023), o Brasil possui um grande potencial para a produção de hidrogênio verde, uma vez que sua matriz energética é predominantemente composta por energias renováveis, com as fontes hidrelétricas, solar, eólica e de biomassa somando aproximadamente, 78% da matriz energética brasileira. Isso permite a criação de um mercado interno de hidrogênio verde, além da possibilidade de exportação para outros países, o que demonstra o grande potencial de produção de hidrogênio verde no país e torna a educação e o ensino voltados para essa área ainda mais importantes.

Apesar de, segundo Ayers et al. (2012), o custo de um hidrolisador PEM ter sido reduzido em 15% entre 2008 e 2012, Barbir et al. (2005) e Carmo et al. (2013) concordam que o elevado custo deste equipamento ainda é uma das principais dificuldades para sua implementação. Essa questão, aliada à escassez desses equipamentos no mercado interno brasileiro, constitui um dos maiores desafios enfrentados por instituições de ensino, sejam faculdades, universidades ou unidades de cursos técnicos profissionalizantes. Diante disso, este estudo apresenta dados de um protótipo de kit didático para a produção de hidrogênio, utilizando técnicas como a manufatura aditiva em sua construção.

## MATERIAL E MÉTODOS

Tendo em vista o objetivo do projeto, o kit foi desenvolvido utilizando um hidrolisador PEM (comprado pré-montado) devido ao seu tamanho compacto, além de outros fatores como alta eficiência, rápida resposta e boa regulagem de produção. Foram empregados tubos de poliuretano, conectores pneumáticos de conexão direta e garrafas PET. As garrafas PET foram utilizadas para o armazenamento e geração de hidrogênio no sistema, considerando que o armazenamento de  $H_2$  é realizado à pressão atmosférica, além de seu baixo custo e boa vedação. Além disso, o fato de o material ser translúcido facilita a coleta de dados relacionados à geração de hidrogênio.

Como mostrado na Figura 1, o sistema utiliza a diferença de altura entre o recipiente de armazenamento de água (previamente enchido com água deionizada) e o resto do kit para garantir a alimentação do hidrolisador com fluxo e pressão de água constantes, eliminando a necessidade de bombas.



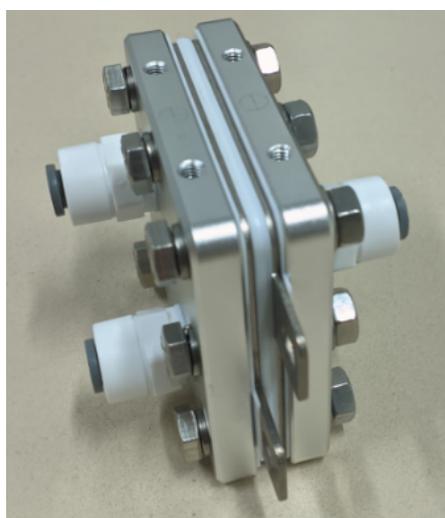
**Figura 1:** Kit didático de produção de hidrogênio em estado operacional

Além disso, o kit conta com dois outros recipientes, um deles serve de armazenamento para o hidrogênio produzido, que, sendo completado com água, se torna um recipiente capaz de armazenar o hidrogênio sem misturá-lo com o ar do ambiente, tendo sido feito testes volumétricos com o recipiente previamente, o mesmo foi graduado de forma a possuir marcações em incrementos de 50 cm<sup>3</sup>, de forma que fosse possível a coleta de informações a respeito da taxa de produção de H<sub>2</sub> do hidrolisador, como visto na Figura 2.



**Figura 2:** Recipiente de coleta de H<sub>2</sub> graduado em incrementos de 50cm<sup>3</sup>

Devido à natureza operacional do hidrolisador PEM, as saídas de hidrogênio e oxigênio são separadas, como visto na Figura 3, de modo que a saída de oxigênio pode ser conectada de volta ao armazenamento de água, enquanto o hidrogênio pode ser conectado a um sistema de armazenamento.(Fig 1)



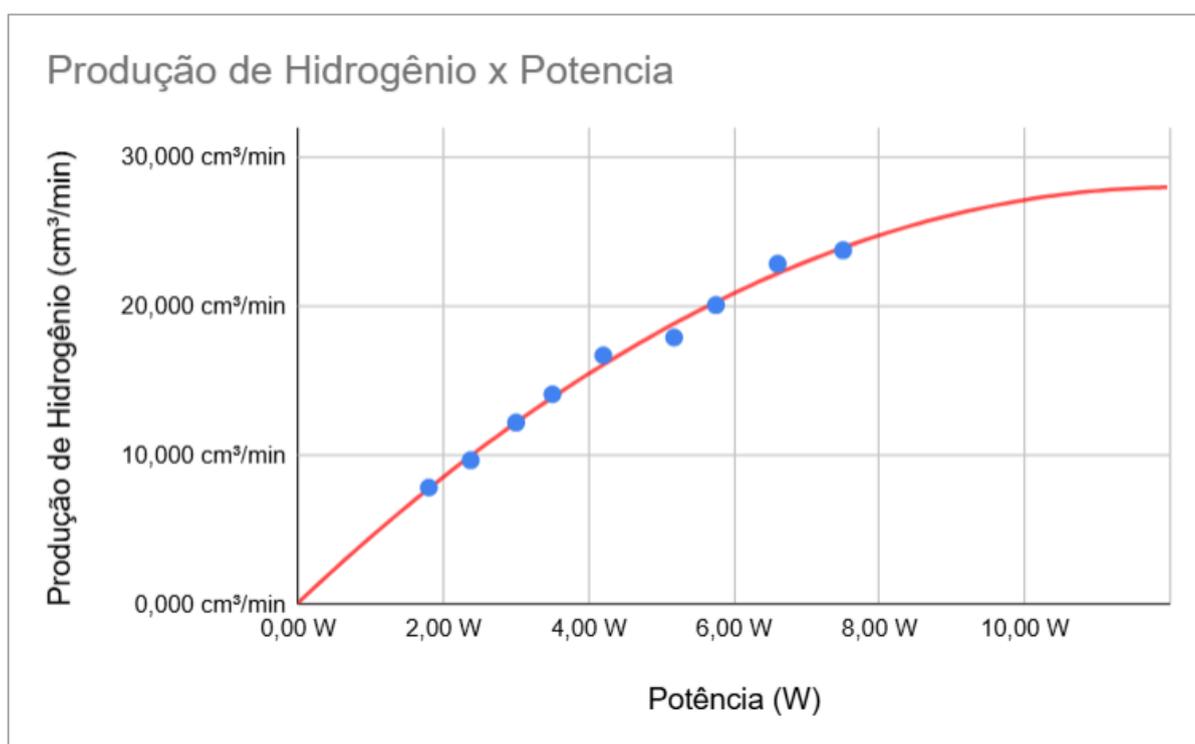
**Figura 3:** Hidrolisador PEM

Os testes iniciais do kit foram realizados com uma fonte de bancada regulável DC, que possibilita uma medição precisa, estável e replicável da tensão e corrente de entrada no hidrolisador. No entanto, testes futuros serão conduzidos com o equipamento sendo alimentado por fontes solares, alinhando-se ao objetivo didático de produção de hidrogênio verde proposto no projeto.

Ademais, o kit foi montado utilizando conectores pneumáticos de engate rápido e tubos de poliuretano, uma vez que esse tipo de conector facilita a conexão dos tubos e garante a vedação do sistema. A vedação dos próprios conectores foi assegurada por meio do uso de porcas e anéis de vedação, garantindo que estivessem devidamente fixados às tampas das garrafas.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para a coleta de dados referente à taxa de produção de  $H_2$  em relação ao tempo, o hidrolisador foi operado em diferentes potências, utilizando-se uma fonte de bancada regulável. Como o recipiente de armazenamento de  $H_2$  é transparente, foi possível visualizar o momento em que a geração de  $H_2$  se iniciou no hidrolisador. O tempo necessário para que a coluna d'água se alinhasse com as marcações presentes no recipiente foi cronometrado, conforme ilustrado na Figura 2. Após isso, todos os dados foram registrados em uma tabela e utilizados para calcular a taxa de geração de hidrogênio em relação às diferentes potências utilizadas, como mostrado no Gráfico 1.



**Gráfico 1:** Relação entre a potência consumida pelo hidrolisador PEM (W) e a taxa de produção de  $H_2$ (cm³/min)

Analisando a linha de tendência dos dados coletados, o gráfico revela que, embora a produção de hidrogênio aumente com a potência, o consumo de energia segue uma relação não linear. Isso indica que, à medida que a potência aumenta, o sistema se torna progressivamente menos eficiente na conversão de energia em hidrogênio. Essa ineficiência crescente é evidente na curva, onde, em níveis de potência mais altos, o incremento na produção de hidrogênio requer uma quantidade de energia exponencialmente maior.

Esse comportamento indica que o hidrolisador PEM enfrenta limitações que afetam sua eficiência energética em altos níveis de potência. Conforme demonstrado por Barbir et al. (2003), à medida que a potência aplicada aumenta, as perdas no sistema, devido à sua natureza operacional, passam a predominar, tornando o processo menos eficiente. Como resultado, cada unidade adicional

de hidrogênio produzida exige uma quantidade significativamente maior de energia, comprometendo a eficiência operacional.

Como discutido anteriormente, ainda são necessárias certas implementações para finalizar o projeto, como a montagem de uma bancada dedicada para facilitar o uso didático, a substituição das garrafas PET por recipientes próprios e graduados, feitos em acrílico, nas etapas de armazenamento de H<sub>2</sub> e de alimentação de água para o hidrolisador. Isso melhoraria a operação e a coleta de dados do kit. Desenvolvimento de alimentação com uma fonte de energia renovável também é necessário, considerando que todo o experimento foi realizado indoor, utilizando uma fonte de bancada regulável.

### CONCLUSÕES

O kit ainda se encontra incompleto, com potencial para melhorias em sua operação e uso didático, conforme discutido anteriormente. No entanto, o kit já está em estado operacional, sendo capaz de armazenar e gerar hidrogênio em diferentes taxas de produção, de acordo com a variação de potência aplicada.

O comportamento do projeto se aproximou do esperado, com a observação de que, quanto maior a potência consumida pelo hidrolisador, maior é a produção de hidrogênio, embora com uma eficiência energética decrescente.

Espera-se que as melhorias mencionadas anteriormente sejam implementadas até o final do projeto, incluindo a pesquisa e testes com geradores solares, além de outras melhorias, com o objetivo de estudar formas de aumentar a eficiência na produção de hidrogênio.

### AGRADECIMENTOS

À instituição de ensino e ao professor orientador por fornecerem a oportunidade de realizar esta pesquisa. A todos os professores e colegas que de alguma forma contribuíram para o trabalho.

### REFERÊNCIAS

ABDULATEEF, A. M.; et al; Renewable energy-to-green hydrogen: A review of main resources routes, processes and evaluation, International Journal of Hydrogen Energy, [S.I.], Vol. 48, Issue 46, p.17383-17408. 2023.

[Renewable energy-to-green hydrogen: A review of main resources routes, processes and evaluation - ScienceDirect](#)

BARBIR, F; PEM electrolysis for production of hydrogen from renewable energy sources, Solar Energy, [S.I.], Vol. 78, Issue 5, p.661-669, 2005.

[PEM electrolysis for production of hydrogen from renewable energy sources - ScienceDirect](#)

CARMO, M.; FRITZ, D. L.; MERGEL, J.; STOLTEN, D.; A comprehensive review on PEM water electrolysis, International Journal of Hydrogen Energy, [S.I.], Vol. 38, Issue 12, p. 4901-4934, 2013.

[A comprehensive review on PEM water electrolysis - ScienceDirect](#)

GARLET, B. T.; SAVIAN, F. S.; RIBEIRO, J. L. D.; SILUK, J. C. M.Unlocking Brazil's green hydrogen potential: Overcoming barriers and formulating strategies to this promising sector, International Journal of Hydrogen Energy, [S.I.], Vol 49, parte D, pp. 553-570. 2024.

[Unlocking Brazil's green hydrogen potential: Overcoming barriers and formulating strategies to this promising sector - ScienceDirect](#)

HASSAN, Q.; ALGBURI, S.; SAMEEN, A. Z.; SALMAN, H. M.; JASZCZUR, M.; Green hydrogen: A pathway to a sustainable energy future, International Journal of Hydrogen Energy, [S.I.], Vol. 50, parte B, p. 310-333. 2024.

[Green hydrogen: A pathway to a sustainable energy future - ScienceDirect](#)

KATHERINE E. AYERS et al; *Recent Advances in Cell Cost and Efficiency for PEM-Based Water Electrolysis*, ECS Trans. 41 15, 2012

[Recent Advances in Cell Cost and Efficiency for PEM-Based Water Electrolysis - IOPscience](#)

KAYA, F. M.; DEMIR, N.; REES, N.V.; EL-KHAROUF, A.; Improving PEM water electrolyser's performance by magnetic field application, Applied Energy, [S.I.], Vol 264. 2020.  
[Improving PEM water electrolyser's performance by magnetic field application - ScienceDirect](#)

SQUADRITO, G.; MAGGIO, G.; NICITA, A.; The green hydrogen revolution, Renewable Energy, [S.I.], Vol 216. 2023  
[The green hydrogen revolution - ScienceDirect](#)