GERADOR DE HIDROGÊNIO VERDE SOLAR POR ELETRÓLISE

Maria Gabriela Chagas de Oliveira – mgco@poli.br
Universidade de Pernambuco, Instituto de Inovação Tecnológica (IIT-UPE).
Caio Vinicius Pinheiro Vital
Universidade de Pernambuco, Instituto de Inovação Tecnológica (IIT-UPE).
Luis Arturo Gómez Malagón
Universidade de Pernambuco, Instituto de Inovação Tecnológica (IIT-UPE).

Resumo. *A crescente necessidade de ações para a redução de emissões de carbono, tem aumentado a demanda por fontes de energia renováveis. No entanto, certas limitações como a intermitência da energia solar e eólica, são desafios a serem superados. Os Sistemas de Armazenamento de Energia (SAE) representam uma solução para alguns desses problemas, destacando-se o uso de hidrogênio como fonte de armazenamento devido a sua versatilidade e potencial sustentável. Este estudo tem como objetivo desenvolver e caracterizar um gerador de hidrogênio por eletrólise e alimentado por energia solar fotovoltaica. O projeto mecânico foi realizado usando um software de CAD e sua construção foi realizada com componentes de baixo custo. A solução eletrolítica empregou hidróxido de sódio em diferentes concentrações. O sistema foi caracterizado usando como fonte de energia elétrica uma fonte de bancada e um painel solar fotovoltaico. Nos experimentos foi analisada a relação entre a concentração de hidróxido de sódio na solução eletrolítica, a tensão e a produção de hidrogênio. A taxa de produção de hidrogênio ao longo do tempo foi obtida, destacando a influência da radiação solar na produção diária. Os resultados indicaram que o gerador desenvolvido é uma alternativa de baixo custo, design simples e replicável, apresentando uma produção média de 1,528 L/hora de hidrogênio, com uma produção total estimada de 10,7 litros durante o período analisado.*

Palavras-chave: *Gerador de Hidrogênio, Hidrogênio Verde, Fontes Renováveis de Energia.*

1. INTRODUÇÃO

O impacto ambiental gerado pelas fontes de energia é um assunto bastante discutido em todo o mundo, principalmente por conta das mudanças climáticas e da busca pela redução na emissão de carbono. Além disso, a comunidade internacional possui um consenso de que ações urgentes são indispensáveis para lidar com os problemas de segurança energética a curto prazo (IEA,2022; IEA,2005). Por essas razões, o uso de fontes renováveis tornou-se uma necessidade, fazendo com que os países busquem incorporá-las em sua matriz energética. De acordo com o Balanço Energético Nacional (BEN) 2023, ano base 2022, as fontes renováveis são responsáveis por 47,4% da Oferta Interna de Energia (OIE) no Brasil em 2022, onde 15,4% são provenientes de biomassa, 12,5% de energia hidráulica, 9% de lenha e carvão vegetal, 7% de lixívia e outras renováveis, 2,3% de energia eólica e 1,2% de energia solar (EPE, 2023).

Contudo, as fontes renováveis possuem algumas limitações. A energia solar e a eólica, por exemplo, não conseguem gerar energia durante todo o tempo. Uma das formas de solucionar esse problema é através do uso de Sistemas de Armazenamento de Energia (SAE), os quais, entre outras funções, disponibilizam energia para a carga quando não tem geração. Os SAE são divididos em sistemas elétricos, como supercapacitores; mecânicos, como sistemas de ar comprimido; térmicos, como sistemas de armazenamento térmico; químicos, como baterias e armazenamento em hidrogênio (Abaque, 2016). Dentre estes sistemas, o armazenamento empregando hidrogênio tem chamado atenção por ser versátil, armazenável e por ter potencial para ser limpo e não poluente, como no caso do hidrogênio renovável, que possui papel importante na descarbonização da energia (Zhou *et al.*, 2022; CGEE, 2022). Seu funcionamento baseia-se na produção de hidrogênio, a partir de uma fonte de energia. Com o uso uma célula a combustível, a energia eletroquímica pode ser convertida em energia elétrica novamente. Por ser armazenável e transportável, o hidrogênio pode contribuir para o equilíbrio entre o fornecimento e a demanda de energia, além de servir como alternativa para o uso de baterias (CGEE, 2010; Rodrigues, 2010; IEA, 2019). No entanto, tal sistema ainda apresenta desafios como o armazenamento e transporte, devido à possível fragilização e corrosão de materiais, sendo necessária uma manutenção frequente e um investimento elevado (Silva, 2019). Desta forma, o uso de geradores de hidrogênio apresenta-se como alternativa para garantir a segurança energética, podendo ser um sistema que atua de forma limpa e sustentável, embora ainda possua algumas dificuldades a serem transpostas.

O hidrogênio é um vetor de energia na forma gasosa. Ele não é facilmente encontrado na natureza de forma livre, já que normalmente está ligado a algum outro elemento ou composto químico, no entanto pode ser produzido a partir de uma ampla gama de fontes de energia primária, como carvão, gás natural, energia nuclear e energias renováveis (IEA, 2005). Sua classificação em cores baseia-se na forma como é obtido, sendo algumas delas: hidrogênio azul, quando é produzido por meio de combustíveis fósseis e a emissão de poluentes é minimizada pela captura de CO_2; hidrogênio cinza, produzido por combustíveis fósseis, mas sem captura de CO_2; hidrogênio preto e marrom, obtido através do uso de carvão; hidrogênio rosa, produzido a partir de energia nuclear; hidrogênio turquesa, através da pirólise do metano; hidrogênio verde, quando proveniente de uma fonte de energia renovável (Osman *et al.*, 2021; Chew *et al.*, 2023).

Segundo a Agência Internacional de Energia (IEA), para que o hidrogênio desempenhe um papel fundamental na descarbonização, sua produção também deve se tornar muito mais limpa do que é atualmente. Por exemplo, cerca de 80% do hidrogênio utilizado no ano de 2020 foi produzido a partir de combustíveis fósseis, na maioria dos casos sem captura de carbono (IEA, 2021). O número de projetos baseados em produção de hidrogênio de baixa emissão pode crescer bastante até 2030, apresentando um aumento de cerca de 50% na produção potencial em comparação com o ano de 2022 (IEA, 2023). Desta forma, é evidenciada a necessidade de desenvolvimento da cadeia de valor da geração de energia baseada em hidrogênio. Visando contribuir na divulgação e entendimento das vantagens e desvantagens desta fonte de energia, neste trabalho é apresentado o desenvolvimento e caracterização de um gerador de hidrogênio verde utilizando energia solar.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Projeto do gerador

Neste estudo, foi desenvolvido um gerador de hidrogênio verde pelo método da eletrólise da água. Este processo eletroquímico consiste em separar o oxigênio e o hidrogênio da água utilizando a eletricidade proveniente de uma fonte de energia renovável, sendo adotada a energia solar neste trabalho. A reação química que acontece durante a eletrólise é devida à passagem de corrente elétrica contínua (CC) entre eletrodos imersos em uma solução eletrolítica, como mostrado na Fig. 1. A adição de eletrólitos na água forma uma solução eletrolítica que aumenta a condutividade elétrica do meio, sendo os sais de hidróxido de sódio e hidróxido de potássio os mais utilizados. (Rezende, 2021; Knob, 2013). Para uma solução eletrolítica básica, as reações que acontecem produzem o gás hidrogênio no cátodo, enquanto a produção do oxigênio ocorre no ânodo, como mostra a Fig. 1.

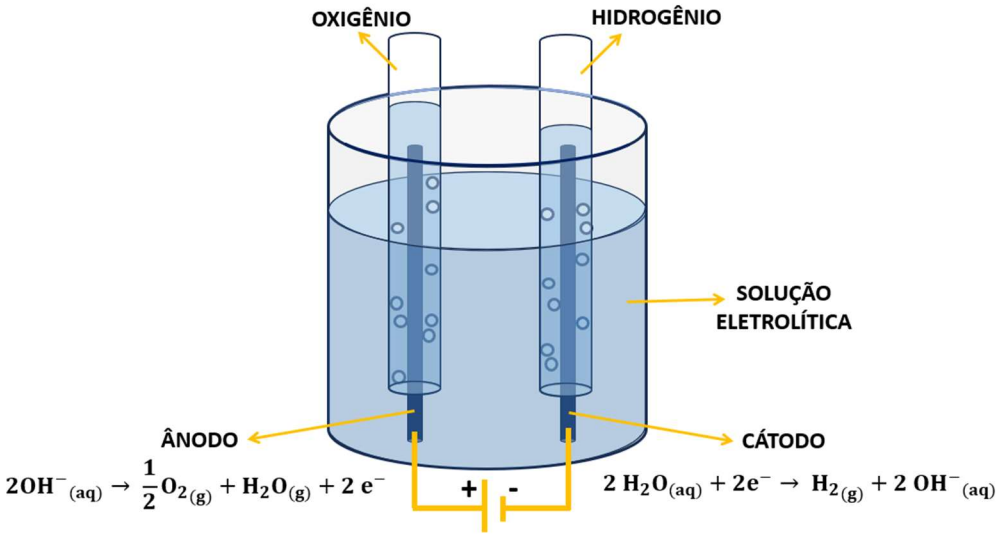

Figura 1 – Representação esquemática do processo de eletrólise.

Desta forma, o sistema de geração de hidrogênio é formado por dois componentes principais: o reator e a fonte de energia elétrica. O reator proposto neste estudo é mostrado na Fig. 2. Neste dispositivo, para garantir a separação entre hidrogênio e oxigênio, dois eletrodos ficam dentro de dois recipientes conectados entre si, permitindo a movimentação dos íons e evitando a mistura entre os gases produzidos. Os terminais do reator serão conectados à fonte de alimentação elétrica. Dentre os requisitos do reator estão: baixo custo, o eletrodo deve possuir boa condutividade elétrica, o modelo do recipiente deve permitir a troca da solução eletrolítica e o material do recipiente e mangueiras deve ser resistente à corrosão.

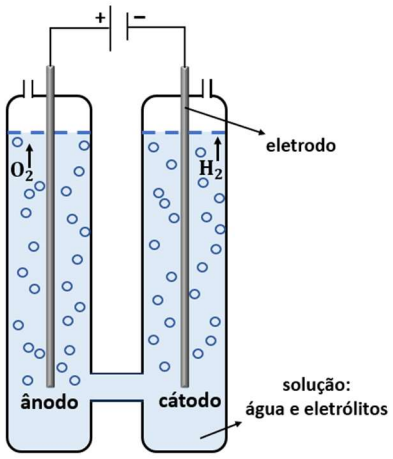

Figura 2 – Representação esquemática do modelo proposto.

2.2 Fontes de alimentação

Visando analisar o comportamento do reator de forma controlada e em campo, o sistema de geração de energia empregou duas fontes de alimentação: uma fonte DC de bancada e um sistema fotovoltaico. No primeiro caso foi utilizada uma fonte DC Tectronix PWS2326 e no segundo caso foi empregado um módulo fotovoltaico SOLAREX modelo SX-55U. Durante os experimentos outdoor foi realizada a medição da radiação solar usando um piranômetro Kipp&Zonen modelo CMP6 e obtida a curva I-V (Corrente – Tensão) usando o traçador de curva I-V HT Instruments modelo SOLAR I-Ve, como mostra a Fig. 3. Os testes outdoor foram realizados na cidade de Recife, Pernambuco, entre os dias 9 de outubro de 2023 e 23 de novembro de 2023.

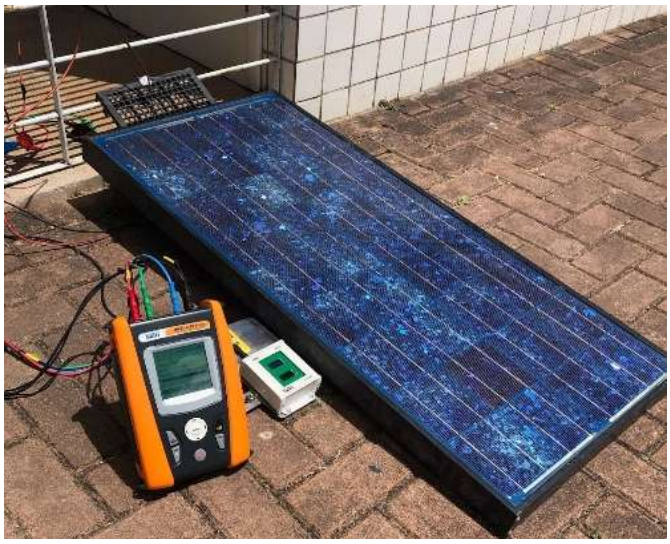

Figura 3 – Utilização do traçador de curvas para caracterização do painel solar.

2.3 Eletrólito

A solução eletrolítica foi preparada utilizando-se diferentes concentrações de hidróxido de sódio, sendo dissolvidas em 1L de água deionizada. Os experimentos foram realizados com concentrações de 50 g/L, 100g/L, 150 g/L, 200 g/L e 250 g/L.

2.4 Procedimento de medição da quantidade de hidrogênio gerado

A metodologia empregada para determinar a quantidade de hidrogênio gerado durante a eletrólise consistiu em fixar as mangueiras de saída de gás do reator em um balde com água, de forma que ambas estivessem submersas a uma mesma profundidade. Desta forma, ao conectar o gerador de hidrogênio à fonte de energia (módulo fotovoltaico ou fonte de bancada), bolhas formadas pela liberação dos gases, hidrogênio e oxigênio, emergem da água. Para a medição de vazão, utilizou-se um recipiente onde uma medição prévia de seu volume total foi feita (15 ml). Em seguida, o recipiente foi submerso no balde, de forma que todo o ar saísse e seu conteúdo fosse apenas água, como mostrado na Fig. 4 (a).

Posteriormente, levou-se o recipiente à saída da mangueira de hidrogênio, permitindo então que o gás ocupasse gradativamente o volume do mesmo, conforme Fig. 4 (b, c e d), até que não houvesse mais água em seu interior. Durante este processo, o tempo foi cronometrado.

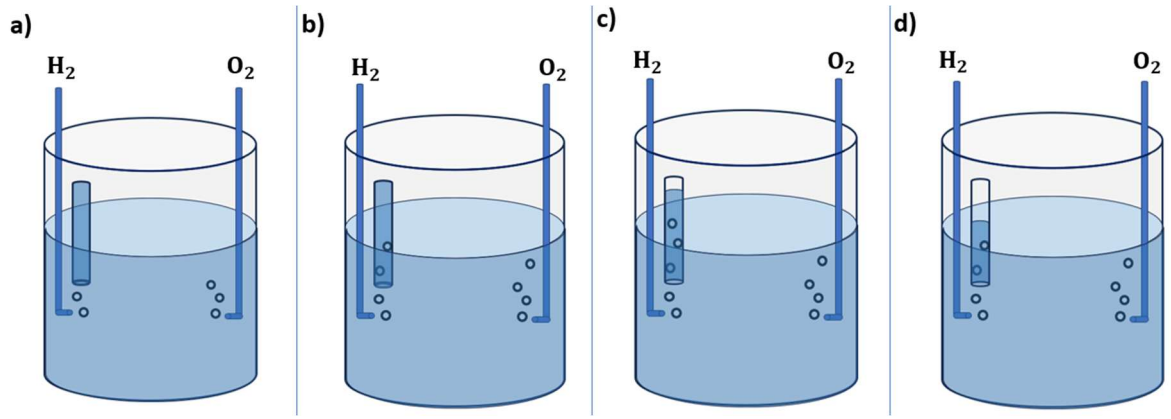

Figura 4 – Representação esquemática da metodologia empregada para a medição do volume de hidrogênio produzido. (a) recipiente imerso na água sem gás em seu interior; (b) bolhas de hidrogênio emergem da água sendo retidas no recipiente; (c, d) gás hidrogênio preenche o recipiente gradativamente.

Dos experimentos com diferentes concentrações da solução eletrolítica feitos com a fonte de bancada, foi obtida a curva corrente-tensão, a partir da qual foi calculada a condutância da célula. A medição da taxa de produção para diferentes concentrações, permitiu relacionar essas duas variáveis. A partir da análise da curva I-V do painel fotovoltaico juntamente com a curva de carga do gerador foi possível estabelecer o ponto de operação do sistema. As taxas de produção obtidas com o uso da fonte de bancada como também do painel fotovoltaico, foram comparadas para diferentes tensões. Com a relação entre irradiância e taxa de produção, foi possível verificar a produção média de hidrogênio por hora.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O projeto do gerador é mostrado na Fig. 5. Na Fig. 5 (a) é mostrada a tampa do recipiente, onde o eletrodo é fixado, bem como a conexão para a mangueira que permitirá a saída dos gases produzidos. Na Fig. 5 (b) é mostrada a conexão na parte inferior do recipiente do reator, permitindo a movimentação de íons durante a reação. O reator completo é apresentado na Fig. 5 (c). Os componentes do projeto foram feitos inicialmente de forma separada, para depois ser feita a montagem.

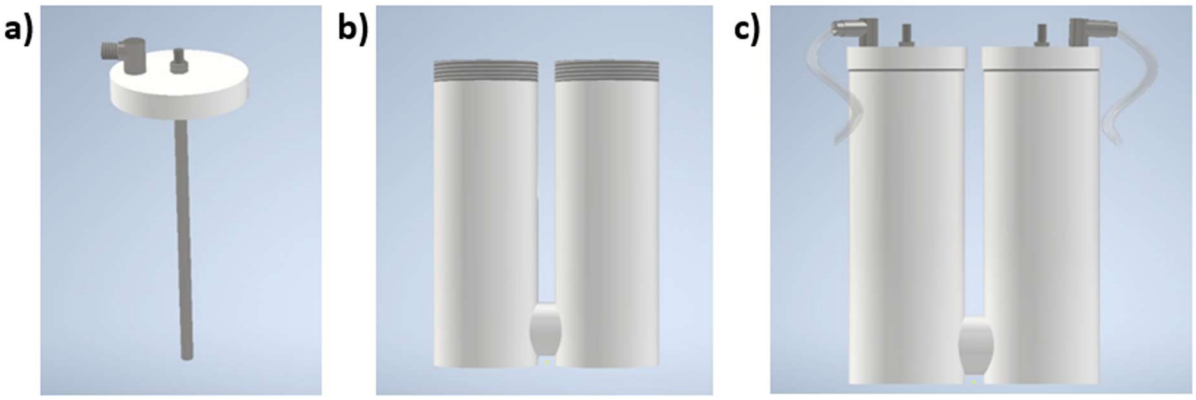

Figura 5 – Modelo do gerador de hidrogênio. (a) tampa com eletrodo e conexão para a mangueira; (b) recipiente; (c) montagem do reator.

Com a modelagem feita, foi possível o desenvolvimento de um protótipo. Para isso, algumas adaptações foram feitas e os seguintes materiais foram utilizados:

- Recipiente:
  - Tubos de PVC de 50 mm e 40 mm;
  - 2 Cap soldáveis de PVC de 50 mm;
  - 2 Cap soldáveis de PVC de 40 mm;

- 2 luvas soldáveis de PVC de 50 mm;
- 2 luvas soldáveis de redução de PVC de 50 x 40 mm;
- 2 Tês soldáveis de PVC de 40 mm;
- 2 mangueiras de silicone de 4 mm de diâmetro (1 m de comprimento para cada);
- 2 conexões para união de mangueiras para aquarismo;
- Nas uniões do PVC foi aplicado adesivo plástico para PVC.

▪ Eletrodos:
- 2 barras roscadas de aço inoxidável de 4 mm (30cm de comprimento para cada);
- 8 arruelas de aço inoxidável de 4 mm;
- 16 porcas de aço inoxidável de 4 mm;
- 2 m de fio paralelo bicolor.

O protótipo do gerador de hidrogênio foi construído como mostrado na Fig. 6 (a, b, c), que detalha o recipiente, a fixação dos eletrodos nas tampas, assim como as mangueiras coletoras de gases. O protótipo em funcionamento é demonstrado na Fig. 6 (d), onde o painel fotovoltaico é utilizado como fonte de energia.

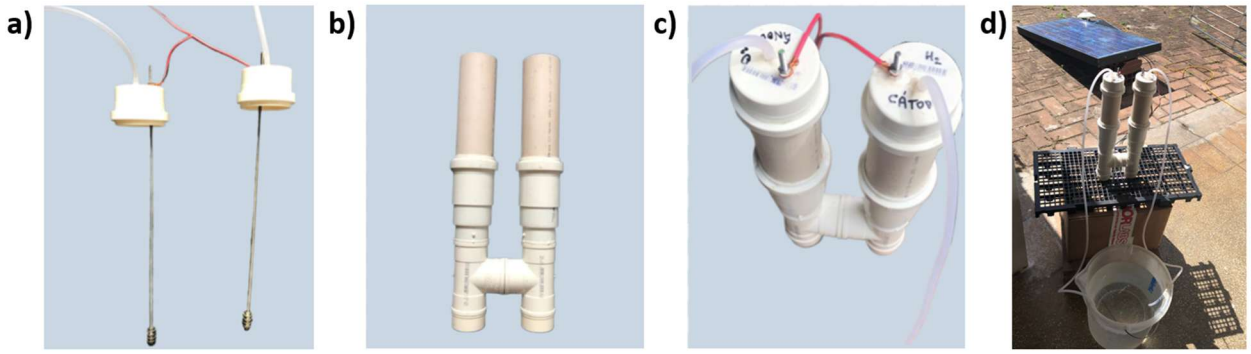

Figura 6 – Protótipo do gerador de hidrogênio. (a) tampa com eletrodo e conexão com a mangueira; (b) recipiente; (c) montagem do reator; (d) protótipo em funcionamento.

3.1 Experimentos indoor

A partir da caracterização das propriedades elétricas da célula eletrolítica com diferentes concentrações de hidróxido de sódio, percebe-se um comportamento ôhmico na faixa analisada, como apresentado nas curvas corrente-tensão da Fig. 7 (a). A região hachurada representa a faixa de tensão para a qual não é observada produção significativa de hidrogênio. A partir da razão entre a corrente elétrica e a tensão, obtém-se a condutância da célula. Como mostrado na Fig. 7 (b), a condutância aumenta com a concentração. Entretanto, o comportamento dessa variável não é linear, dado que a taxa de variação é reduzida com uma elevação da concentração.

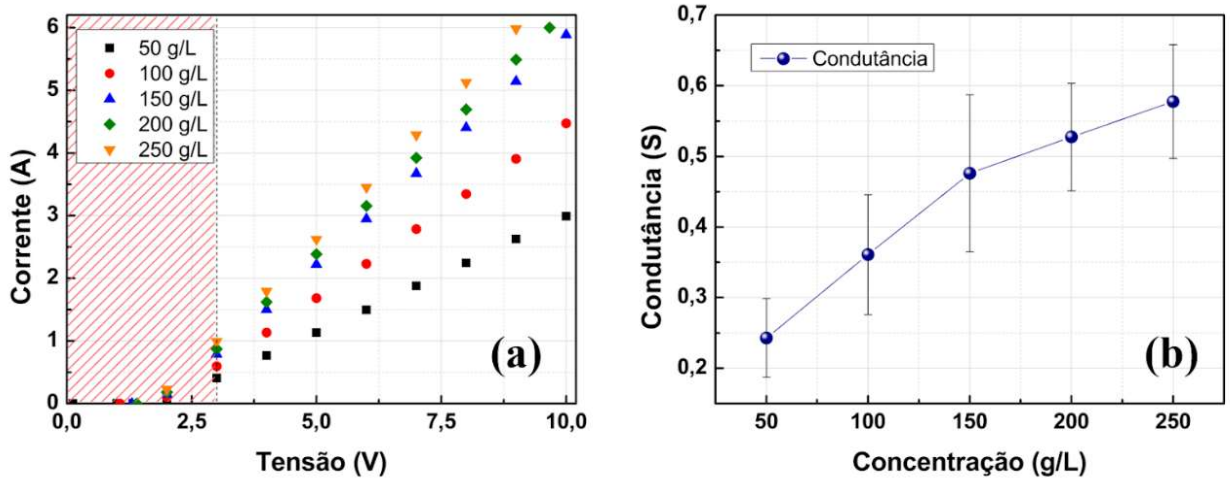

Figura 7 - (a) Relação entre corrente e tensão para diferentes concentrações de NaOH no gerador; (b) Condutância do gerador para diferentes concentrações de NaOH.

A taxa de produção de hidrogênio foi avaliada para diferentes valores de concentração de hidróxido de sódio, utilizando a fonte de bancada para alimentação do gerador. Percebe-se que o aumento da concentração está relacionado a uma maior taxa de produção de hidrogênio, como mostrado no gráfico da Fig. 8. Contudo, a derivada da taxa de produção decresce para concentrações mais elevadas, o que conduz a um efeito de saturação.

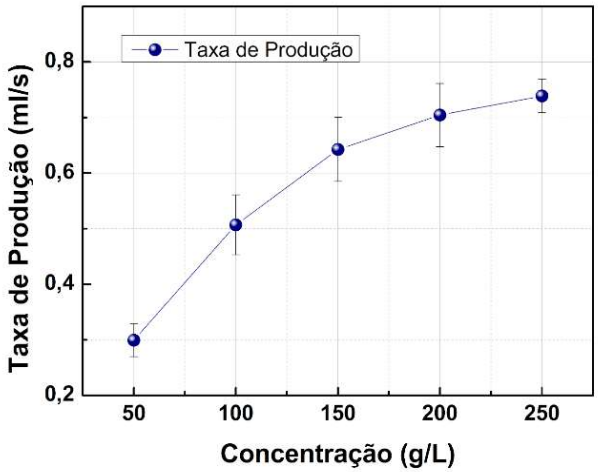

Figura 8 - Taxa de produção de hidrogênio para diferentes concentrações de NaOH utilizando uma tensão de 9V fornecida pela fonte de bancada.

3.2 Experimentos outdoor

A caracterização do painel fotovoltaico utilizado para alimentação do gerador foi realizada através da obtenção da curva I-V mostrada na Fig. 9. Considerando a curva de carga para o gerador com concentração eletrolítica de 150 g/L, o ponto de operação para uma irradiância de 1200 W/m² é dado pela interseção entre as curvas, que ocorre a uma tensão de 7,9 V e corrente de 4,3 A.

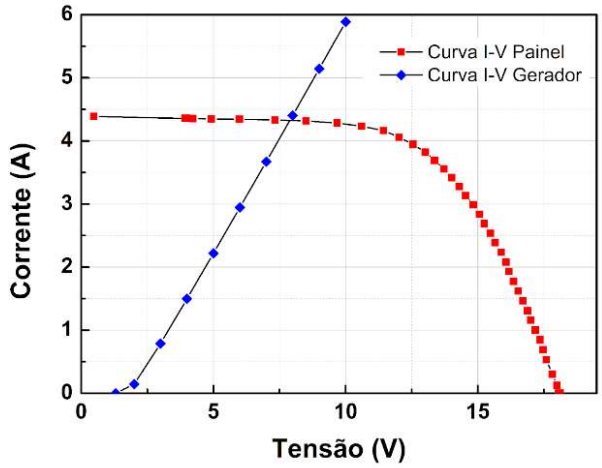

Figura 9 - Curvas I-V do painel fotovoltaico e do gerador de hidrogênio.

O comportamento do gerador para diferentes valores de tensão foi avaliado utilizando a fonte de bancada e o painel fotovoltaico para fornecimento de energia, adotando uma concentração constante de 150 g/L de hidróxido de sódio. A partir do gráfico da Fig. 10, percebe-se que a taxa de produção de hidrogênio aumenta de forma aproximadamente linear em relação à tensão na faixa de valores analisada. Além disso, os valores de taxa de produção são semelhantes para as duas formas de alimentação do dispositivo para um determinado valor de tensão.

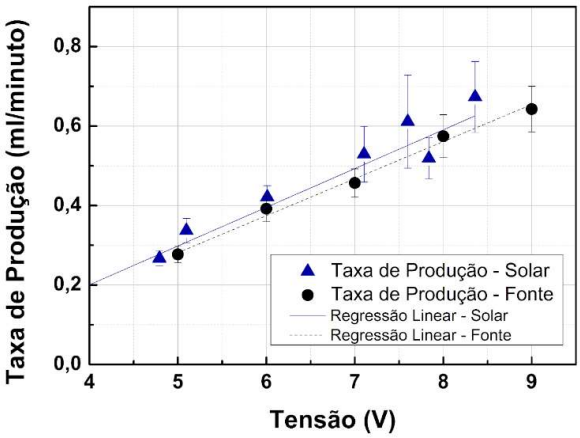

Figura 10 - Taxa de produção de hidrogênio para o gerador com concentração de NaOH igual a 150 g/L alimentado pelo painel fotovoltaico e pela fonte de bancada.

O desempenho do gerador ao longo do tempo utilizando o painel fotovoltaico como fonte de alimentação é exibido no gráfico da Fig. 11 (a). Os dados foram coletados no dia 23 de novembro de 2023, das 09:40 às 16:40. Nota-se que o comportamento da taxa de produção acompanha a tendência dos valores de irradiância ao longo do dia. O valor máximo da taxa de produção medido foi 0,67 ml/s, às 11:36. Já o valor mínimo foi de 0,08 ml/s às 16:40. Neste experimento os valores de irradiância obtidos são diferentes em relação ao esperado para a localidade. O gráfico da Fig. 11 (b) compara os dados de radiação global medidos no local do teste e os valores medidos em uma estação solarimétrica a 3,7 km de distância. A diferença entre os valores é atribuída à radiação refletida pelos obstáculos presentes no local do teste, tais como vegetação e as paredes do prédio, como mostrado na Fig. 3.

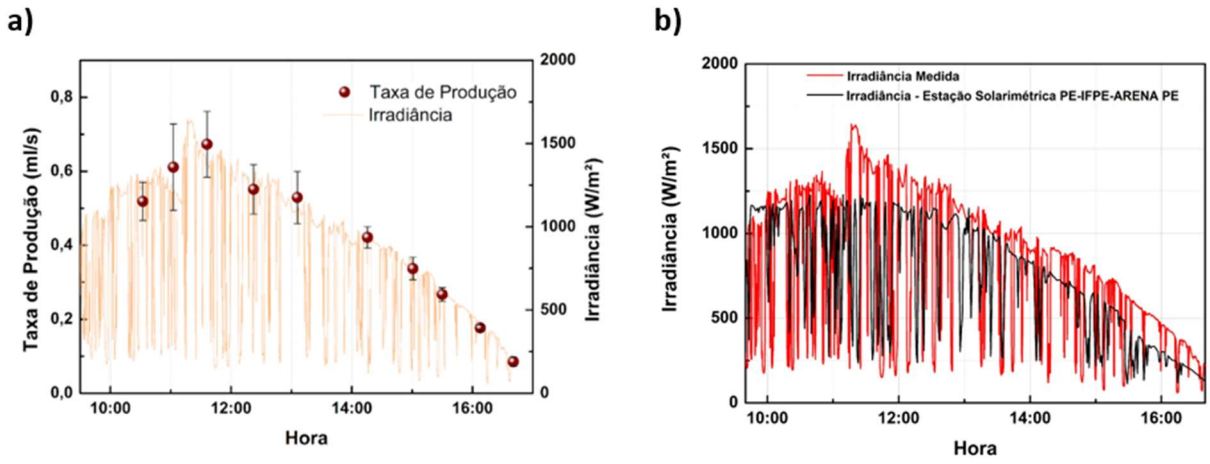

Figura 11 – (a) Taxa de produção de hidrogênio e irradiância medidos ao longo do dia com gerador utilizando concentração de 150 g/L de NaOH. (b) Comparação entre a irradiância medida no experimento e a irradiância medida na Estação Solarimétrica PE-IFPE-ARENA PE no dia 23 de novembro de 2023 (REDESOLPE, 2024).

A partir da interpolação linear dos dados de produção registrados e integração ao longo do tempo, obteve-se um valor estimado de produção de 10,7 litros de hidrogênio durante o período analisado, correspondendo a uma taxa de produção média de 1,528 L/ hora. A Tab. 1 apresenta valores obtidos em outros estudos que desenvolveram geradores de hidrogênio. Destaca-se que diferentes eletrólitos, materiais de eletrodos, horários de medição e valores de irradiação influenciam diretamente nos resultados encontrados.

Tabela 1 – Produção de hidrogênio obtida em diferentes estudos.

Autor	Eletrólito	Material do eletrodo	Horário de medição	Duração da medição	Produção durante o período analisado
Palhares, 2016	Hidróxido de sódio	Aço inox	10:00 às 14:00	4 horas	2 L
Knob, 2013	Hidróxido de potássio	Níquel	09:30 às 13:43	4 horas e 13 minutos	0,58 g
Cabezas et al., 2014	Hidróxido de potássio	Aço inox	—	Dia (durante o período de sol)	5 L
Presente Estudo	Hidróxido de sódio	Aço inox	09:40 às 16:40	7 horas	10,7 L

4. CONCLUSÃO

Neste trabalho foi desenvolvido um protótipo de gerador de hidrogênio verde solar. O dispositivo tem design simples e utiliza componentes acessíveis, o que facilita sua replicabilidade. Além disso, o design do gerador favorece a separação dos gases produzidos.

A partir da caracterização elétrica do gerador, percebe-se um comportamento linear entre tensão e corrente. O aumento da concentração do eletrólito implica num aumento da condutância. Porém, para valores de concentração acima de 150 g/L, esse aumento é reduzido, de forma que não há ganhos significativos com a utilização de concentrações superiores. Comparando a curva de carga do gerador com a curva I-V do painel fotovoltaico, percebe-se que o painel não opera na zona de máxima potência para concentração de 150 g/L. Para alcançar regiões de melhor desempenho do painel, é indicada a utilização de concentrações reduzidas.

Apesar da taxa de geração de hidrogênio ser influenciada pela concentração de NaOH, percebe-se um efeito de saturação para valores elevados, o que indica uma estagnação na taxa de produção para essas concentrações. Não houve diferença relevante entre os níveis de produção do gerador utilizando a fonte de bancada e o painel solar para alimentação do dispositivo. Assim, o painel solar configura uma opção aplicável de fornecimento de energia para o gerador.

A taxa de produção de hidrogênio segue a tendência da radiação solar ao longo do dia. A produção diária total é estimada em 10,7 litros de hidrogênio. O valor é superior ao reportado para dispositivos semelhantes, o que evidencia sua eficácia.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Instituto de Inovação Tecnológica da Universidade de Pernambuco (IIT/UPE) e seus colaboradores por toda a estrutura e apoio fornecidos para o desenvolvimento do trabalho.

REFERÊNCIAS

Bueno, A. F. M., Brandão, C. A. L., 2017. Visão Geral de Tecnologia e Mercado para os Sistemas de Armazenamento de Energia Elétrica no Brasil, ABAQUE, Belo Horizonte.

Cabezas, M. D. *et al*., 2014. Hydrogen energy vector: demonstration pilot plant with minimal peripheral equipment., International Journal of Hydrogen Energy, vol. 39, n. 32, pp. 18165-18172.

CGEE, 2010. Hidrogênio Energético no Brasil. Subsídios para Políticas de Competitividade: 2010-2025, Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, Brasília.

CGEE, 2022. Desenvolvimento Global e Mudança do Clima. Mesa de Diálogos - A Era do Hidrogênio Renovável, Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, Brasília.

Chew, Y. E. *et al.,* 2023. Beyond the colours of hydrogen: opportunities for process systems engineering in hydrogen economy, Process Integr Optim Sustain, vol. **7**, pp. 941–950.

EPE, 2023. Relatório Síntese do Balanço Energético Nacional – BEN 2023: Ano base 2022, Empresa de Pesquisa Energética, Rio de Janeiro.

IEA, 2005. Prospects for Hydrogen and Fuel Cells, OECD, Paris.

IEA, 2019. The Future of Hydrogen. Seizing Today's Opportunities, International Energy Agency, Paris.

IEA, 2021. Global Hydrogen Review 2021, International Energy Agency, Paris.

IEA, 2022. World Energy Outlook, International Energy Agency, Paris.

IEA, 2023. Global Hydrogen Review 2023, International Energy Agency, Paris.

Knob, D., 2013. Geração de Hidrogênio por Eletrólise da Água Utilizando Energia Solar Fotovoltaica, Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, São Paulo.

Osman, A. I. *et al.,* 2022. Hydrogen production, storage, utilization and environmental impacts: a review, Environ Chem Lett, vol. 20, pp. 153–188.

Palhares, D. D. F., 2016. Produção de Hidrogênio por Eletrólise Alcalina da Água e Energia Solar, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

REDESOLPE, 2024. Rede Solarimétrica de Pernambuco. Disponível em: <https://redesolpe.com.br/#Estacoes>. Acesso em: 30 de janeiro de 2024.

Rezende, L. A., 2021. Desenvolvimento e Análise Experimental de um Gerador de Hidrogênio por Eletrólise, Dissertação de Mestrado, UNESP, Guaratinguetá.

Rodrigues, R. A., 2010. Célula de Hidrogênio: Construção, Aplicações e Benefícios, Revista Brasileira de Gestão e Engenharia, vol. 1, n. 1, pp. 47-62.

Silva, D. C. S., 2021. Os Principais Desafios do Uso do Hidrogênio no Contexto Brasileiro para a Descarbonização: Uma Breve Revisão Bibliográfica, Trabalho de Conclusão de Curso, PUC - Rio, Rio de Janeiro.

Zhou, Y. et al., 2022. Green hydrogen: A promising way to the carbon-free society, Chinese Journal of Chemical Engineering, vol. 43, pp. 2-13.

SOLAR GREEN HYDROGEN GENERATOR BY ELECTROLYSIS

Abstract. *The increasing need for actions to reduce carbon emissions has driven the demand for renewable energy sources. However, challenges such as the intermittency of solar and wind energy pose hurdles to overcome. Energy Storage Systems (ESS) represent a solution, with hydrogen standing out as a versatile and sustainably potential storage source. This study aims to develop and characterize a hydrogen generator through electrolysis, powered by photovoltaic solar energy. The mechanical design was conducted using CAD software, and its construction utilized low-cost components. The electrolytic solution employed sodium hydroxide in varying concentrations. The system was characterized using both a benchtop power source and a photovoltaic solar panel as electrical energy sources. The experiments analyzed the relationship between sodium hydroxide concentration in the electrolytic solution, voltage, and hydrogen production. The hydrogen production rate over time was obtained, emphasizing the influence of solar radiation on daily production. The results indicated that the developed generator is a low-cost, simple, and replicable alternative, showcasing an average hydrogen production rate of 1.528 L/hour, with a total estimated production of 10.7 liters during the analyzed period.*

Keywords: *Hydrogen Generator, Green Hydrogen, Renewable Energy Sources.*