

ESTABILIDADE OPERACIONAL DE UMA CÉLULA ELETROLÍTICA COMPACTA PARA PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO VERDE

J. G. Duarte¹, J. L. Ferreira Júnior², P. R. Queiroz³, G.R.P Malpass⁴

¹ Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Uberaba, Brasil
(jonas.gabriel.campos.duarte@gmail.com)

² Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Uberaba, Brasil

³ Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Uberaba, Brasil

⁴ Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Uberaba, Brasil

Este trabalho avaliou o desempenho inicial de um protótipo de célula eletrolítica de fluxo compacto para geração de hidrogênio verde via eletrólise da água. O objetivo foi analisar a relação entre a dinâmica de fluxo e a estabilidade operacional e mecânica do conjunto sob correntes de 0,5 a 1,5 A. Os resultados mostraram aumento linear na produção de gás, atingindo 13,44 mL/min, em consonância com a Lei de Faraday, demonstrando excelente repetibilidade e robustez estrutural sem vazamentos.

Palavras-chave: Eletroquímica; Eletrólise; Hidrogênio.

INTRODUÇÃO

A busca por matrizes energéticas sustentáveis e descarbonização tem demonstrado ser um pilar central nas discussões geopolíticas e tecnológicas atuais, motivadas pela urgência em frear os efeitos das mudanças climáticas globais. Nesse cenário de busca pela transição, o hidrogênio se destaca não apenas como um vetor energético promissor, mas como alternativa para a flexibilização e integração de sistemas baseados em fontes renováveis. Produzido via eletrólise, ou seja, a quebra da molécula de água em hidrogênio e oxigênio (por meio de energia elétrica) esse processo se diferencia pela ausência de emissão de poluentes. Todavia, a viabilidade técnica e a expansão econômica dos sistemas dependem diretamente de aprimoramento e das taxas de eficiência dos mecanismos de conversão eletroquímica utilizados.

Além disso, processos eletrolíticos são conhecidos e frequentemente utilizados em escala laboratorial ou industrial para obtenção de hidrogênio (H₂) e cloro (Cl₂) gasosos. Porém, o dimensionamento ou montagem desse tipo de sistema demanda muito estudo e entendimento dos mecanismos físico-químicos presentes. Nesse contexto, a compreensão dos mecanismos de reação e parâmetros elétricos envolvidos é essencial para a construção deste tipo de sistema.

Entre os principais desafios destaca-se o desempenho dos processos eletrolíticos compactos, que integram

de forma equilibrada, controle operacional e estabilidade de geração. Diante disso, o estudo de novas dinâmicas de fluxo associadas às células surge para viabilizar a produção de hidrogênio em escala reduzida.

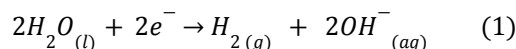
Nessa perspectiva, este trabalho tem como objetivo demonstrar o desempenho preliminar de um protótipo voltado à geração de hidrogênio molecular via eletrólise da água do mar simulada (NaCl 0,1 mol/ L-1), com foco principal na relação entre a dinâmica de fluxo e a estabilidade do conjunto.

MATERIAL E MÉTODOS

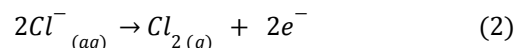
Mecanismos de reação

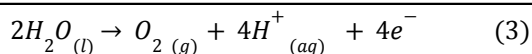
Os mecanismos de reação do processo se resumem às reações catódicas e anódicas. No cátodo ocorre a eletrólise da molécula de água, com a formação de hidrogênio gasoso (H₂) e o íon hidroxila (OH⁻), já no ânodo ocorre a oxidação do ânion (Cl⁻) e da molécula de água (H₂O). As reações envolvidas são descritas conforme as equações químicas 1, 2 e 3 (JEJE *et al.*, 2024 ; GAO; YU; GAO, 2022; SHIVA KUMAR; HIMABINDU, 2019):

Cátodo:



Ânodo:





As reações foram dispostas em um modelo que representa a célula eletroquímica de forma didática (ver Figura 1). Nesse modelo é possível entender como o fluxo de elétrons ocorre na célula, além de permitir uma visualização das reações nos eletrodos.

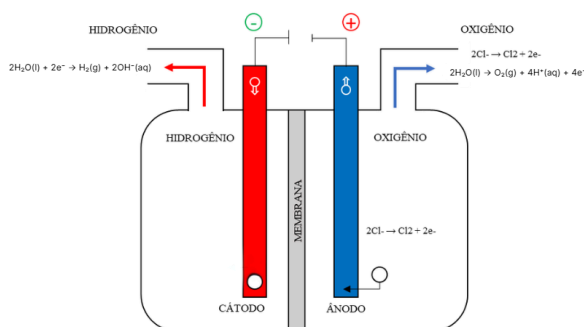


Figura 1. Esquema do processo de eletrólise

Configuração da Célula Eletroquímica

O protótipo utilizado (ver Figura 2) consiste em uma célula eletroquímica de fluxo contínuo montada em arranjo compacto, composta pelos seguintes elementos estruturais:

- Chapa externa de aço, responsável pela sustentação mecânica do conjunto;
- Espaçadores de Teflon, utilizados para garantir a vedação e o isolamento elétrico e físico entre os compartimentos;
- Eletrodos dimensionalmente estáveis (DSA®). Esse material é amplamente utilizado em processos eletroquímicos industriais devido à sua alta estabilidade e durabilidade frente a correntes elevadas (Fu et al., 2023);
- Suporte estrutural, destinado à fixação e ao alinhamento de todos os componentes.

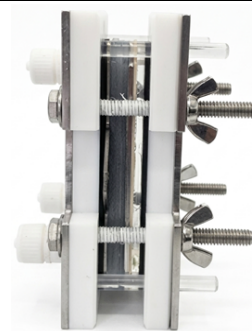


Figura 2. Célula eletroquímica

Sistema de Fluxo e Coleta de Gás

A célula eletroquímica foi inserida em um sistema de fluxo contínuo, contendo reservatórios (catódico e anódico) com solução de água do mar simulada ($NaCl$ $0,1 \text{ mol/L}$). A sua circulação no cátodo e ânodo da célula foi feita utilizando uma bomba peristáltica, garantindo a renovação contínua dessa solução em ambos os compartimentos (ver Figura 3). O gás hidrogênio (H_2) produzido no compartimento catódico foi conduzido até uma proveta (invertida) com água, assim foi possível quantificar o hidrogênio gerado por meio do deslocamento volumétrico.

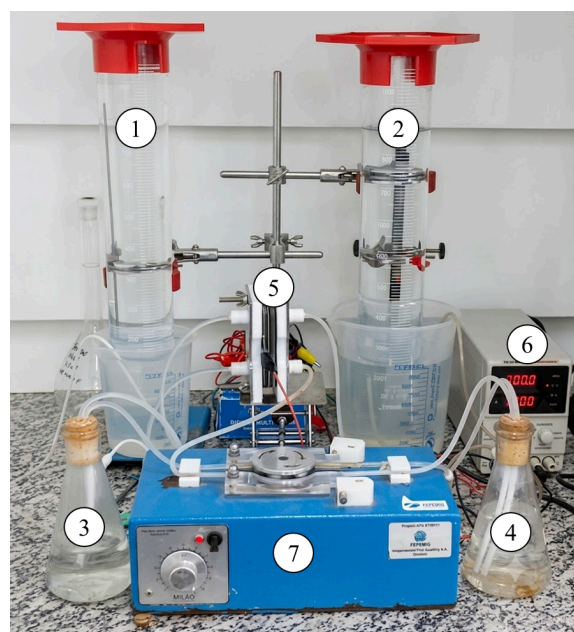


Figura 3. Sistema: 1 - proveta de coleta de Oxigênio (O_2), e gás cloro (Cl_2) 2 - proveta de coleta de Hidrogênio, 3 - reservatório de efluentes, 4 - reservatório de efluentes, 5 - célula eletroquímica, 6 - fonte de alimentação elétrica, 7 - bomba peristáltica.

Procedimento Experimental

Os ensaios foram feitos utilizando corrente constante, através de uma fonte de alimentação DC® estabilizada. Foram avaliadas três condições de corrente elétrica aplicada, 0,5 A, 1,0 A e 1,5 A, onde cada uma foi feita em triplicata, com tempo fixo (inicial) de eletrólise de 15 minutos por ensaio. O volume de gás hidrogênio produzido foi registrado ao final de cada experimento, o que possibilitou o cálculo da vazão volumétrica média de produção para cada condição de corrente. Os dados experimentais coletados na célula de fluxo, obtidos em triplicata para cada corrente elétrica aplicada durante os 15 minutos de eletrólise, são apresentados na Tabela 1, juntamente com a vazão volumétrica média de geração de H₂ calculada para cada condição.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foi observado um aumento considerável na produção de H₂ à medida que se aumentava a corrente elétrica. O volume médio observado passou de 60,0 mL, com 0,5 A, para 201,7 mL com 1,5 A, o que corresponde a um aumento de 236% no volume, para um acréscimo de 1 A da corrente. Esse comportamento mostra que o processo pode ser descrito pela lei de Faraday para eletrólise, segundo a qual a quantidade de substância gerada é proporcional à carga elétrica que atravessa o sistema ($Q = I \cdot t$) (Pletcher & Walsh, 1993).

A vazão volumétrica de produção de H₂ acompanhou essa tendência, elevando-se de 4,00 mL min⁻¹ (0,5 A) para 13,44 mL min⁻¹ (1,5 A). Esse comportamento proporcional entre a corrente e o volume produzido é um indicador de que, nessa faixa de corrente, a célula operou sob baixas perdas, como formação de bolhas que prejudicaram o contato entre o eletrólito-eletrodo, ou limitações de transporte de massa.

Analisando a estrutura e funcionamento da célula, foi possível observar que não houve vazamentos no conjunto de espaçadores de *Teflon*, nem deslocamento dos componentes fixados pelo suporte e pela chapa externa de aço, mesmo sob a maior corrente testada (1,5 A), indicando que a construção do protótipo foi feita corretamente. Além disso, foi possível observar uma repetibilidade do sistema de bombeamento peristáltico e do método de coleta volumétrica empregados.

Um outro aspecto fundamental vem dos ânions cloreto presentes na água do mar. No ânodo, esses íons irão competir diretamente com a molécula de água no processo oxidativo, conforme as equações 2 e 3. A viabilidade do processo depende do controle da competição HER¹/CER² (*Hydrogen Evolution Reaction¹; Chlorine Evolution Reaction²*) e da

corrosão por íons cloreto. Conforme Pletcher e Walsh (1993), embora a eletrólise da água apresenta potencial termodinâmico mínimo de 1,23 V, em meio salino esse valor é elevado devido às variações de concentração iônica, favorecendo a competição entre a reação de evolução de hidrogênio (HER) e a reação de evolução de cloro (CER). Em soluções ricas em Cl⁻, a equação de Nernst (4), indica o deslocamento dos potenciais eletroquímicos, o que pode tornar a CER termodinamicamente competitiva em relação à HER, exigindo maior controle dos parâmetros de geração.

$$E = E^{\circ} - \frac{RT}{nF} \ln(Q) \quad (4)$$

Com correntes mais altas (1,5A), ocorre um deslocamento cinético do sistema, podendo favorecer a formação de gás cloro (Cl₂) em detrimento do oxigênio (O₂). Essa dinâmica de competição reforça a necessidade futura de quantificar analiticamente os gases e o pH do efluente anódico para avaliar o impacto ambiental e a seletividade do protótipo antes de sua transição para sistemas de larga escala.

Os resultados preliminares desse protótipo mostraram que o arranjo estrutural proposto apresenta robustez e confiabilidade, que serão essenciais para estudos futuros envolvendo correntes mais elevadas, variação da vazão de bombeamento e emprego de eletrodos alternativos, como o diamante dopado com boro (BDD), conforme apontado em estudos correlatos sobre eletrólise da água (Badea et al, 2022). Ademais, o planejamento de futuros experimentos e a modelagem matemática do sistema poderão ser otimizados por meio da Metodologia de Superfície de Resposta (RSM), permitindo a melhoria multivariada das condições operacionais da célula com máxima eficiência estatística (BEZERRA et al., 2008).

Tabela 1. Relação Corrente VS Volume

Corrente (A)	Volume gerado (mL)	Tempo (min)	Média
0,5	65	15	60
0,5	55	15	
0,5	60	15	
1	115	15	116,7
1	115	15	
1	120	15	
1,5	205	15	201,7
1,5	200	15	
1,5	200	15	

CONCLUSÃO

Os resultados obtidos demonstram que o protótipo de célula eletrolítica de fluxo desenvolvido apresentou desempenho operacional e estabilidade estrutural satisfatórios na faixa de corrente estudada (0,5 a 1,5 A). O aumento da corrente elétrica aplicada resultou em incremento proporcional do volume e da vazão de hidrogênio gerado, em concordância com o comportamento esperado pela Lei de Faraday, sem indícios de comprometimento mecânico da célula, mesmo aumentando a corrente para 1,5A. Esses resultados iniciais validam a configuração estrutural adotada, composta por eletrodo *DSA*[®] e sistema de bombeamento peristáltico, como base sólida para a continuidade dos estudos, incluindo a ampliação da faixa de corrente avaliada e a investigação de eletrodos alternativos. Estes estudos posteriores serão essenciais para garantir estudos de eficiência que validem o sistema e processo como uma ferramenta aplicável na busca por matrizes energéticas sustentáveis que favoreçam a descarbonização. Nesse sentido, a transição para testes em escala piloto e análises de viabilidade econômica representam o próximo passo lógico para consolidar a tecnologia e sua real viabilidade de mercado.

AGRADECIMENTOS

FAPEMIG, CAPES, CNPq e UFTM

REFERÊNCIAS

BADEA, Gabriela Elena; HORA, Calin; MAIOR, Ioana; COJOCARU, Adrian; SECUI, Calin; FILIP, Sorin Mihai; DAN, Florin Cioara. Sustainable hydrogen production from seawater electrolysis: through fundamental electrochemical principles to the most recent development. *Energies*, [S.L.], v. 15, n. 22, 2022. **MDPI**. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en15228560>. Acesso em: 22 jun. 2026.

BEZERRA, Marcos A.; SANTELLI, Ricardo E.; OLIVEIRA, Eliane P.; VILLAR, Leonardo S.; ESCALEIRA, Luciane A. Response surface methodology (RSM) as a tool for optimization in analytical chemistry. *Talanta*, [S.L.], v. 76, n. 5, p. 965-977, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2008.05.019>. Acesso em: 22 jun. 2026.

FU, R.; ZHANG, P. S.; JIANG, Y. X.; SUN, L.; SUN, X. H. Wastewater treatment by anodic oxidation in electrochemical advanced oxidation process: advance in mechanism, direct and indirect oxidation detection methods. *Chemosphere*, [S.L.], v. 311, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045653522034865>. Acesso em: 23 jun. 2026.

GAO, Fei-Yue; YU, Peng-Cheng; GAO, Min-Rui. Seawater electrolysis technologies for green hydrogen production: challenges and opportunities. **Current**

Opinion in Chemical Engineering, v. 36, p. 100827, 2022. DOI: 10.1016/j.coche.2022.100827. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.coche.2022.100827>. Acesso em: 26 jun. 2026.

JEJE, Samson Olaitan; MARAZANI, Tawanda; OBIKO, Japheth Oirere; SHONGWE, Mxolisi Brendon. Advancing the hydrogen production economy: a comprehensive review of technologies, sustainability, and future prospects. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 78, p. 642–661, 2024. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2024.06.344. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.06.344>. Acesso em: 26 jun. 2026.

PLETCHER, Derek; WALSH, Frank C. Industrial electrochemistry. Dordrecht: Springer Netherlands, 1993.

SHIVA KUMAR, S.; HIMABINDU, V. Hydrogen production by PEM water electrolysis – a review. **Materials Science for Energy Technologies**, [S.L.], v. 2, n. 3, p. 442-454, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.mset.2019.03.002>. Acesso em: 22 jun. 2026.