

AVALIAÇÃO DE QUALIDADE DE ÁGUA PARA GERAÇÃO DE HIDROGÊNIO VERDE POR MEIO DA ELETRÓLISE

Letícia Aparecida Faria¹ (IC), Regina Mambeli de Barros (PQ)¹

¹Graduanda em Engenharia Hídrica, Universidade Federal de Itajubá

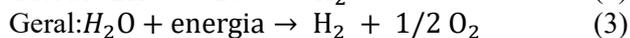
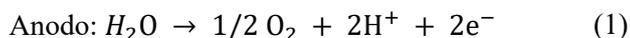
Palavras-chave: Descarbonização. Eletrólise. Hidrogênio Verde.

Introdução

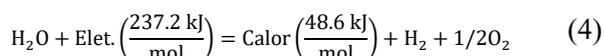
O Hidrogênio é um dos elementos mais abundantes da natureza, mas está sempre junto de outras substâncias formando moléculas como a da água, por exemplo. Para a obtenção do combustível hidrogênio (H₂) é necessário o uso de tecnologias apropriadas, demandando uma quantidade significativa de energia no processo.

Apesar de exigir certos procedimentos para obtê-lo individualmente, o H₂ é um gás altamente inflamável, com três vezes mais energia do que, por exemplo, a gasolina. Além disso, segundo Francisco Diniz Bezerra (2021), espera-se que o hidrogênio atenuar os impactos das alterações na atmosfera, pois representa baixa emissão de carbono nos múltiplos setores, o que incentiva a descarbonização e vem despertando interesse nas principais economias em produzir o H₂.

Segundo Roberto Liberato Neto (2007), a eletrólise define-se como uma reação química desencadeada a partir de uma fonte de energia externa ao sistema químico. O fornecimento da tensão e da corrente contínua é efetuado entre os eletrodos do eletrolisador, sendo os mesmos separados por um eletrólito com boa condutividade iônica. Assim, a eletrólise da água proporciona a quebra da molécula da água em hidrogênio e oxigênio, a partir das equações 1, 2 e 3, em que 1 ocorre no ânodo, 2 no cátodo e 3 é a equação geral da eletrólise:



De acordo com Barros et. al. (2023), baseado em Shi et al. (2017) e Simões et al. (2021), a produção de Hidrogênio, por meio da eletrólise da água, consome cerca de 9 kg de água por 1 kg de H₂ conforme a equação 4 a seguir:

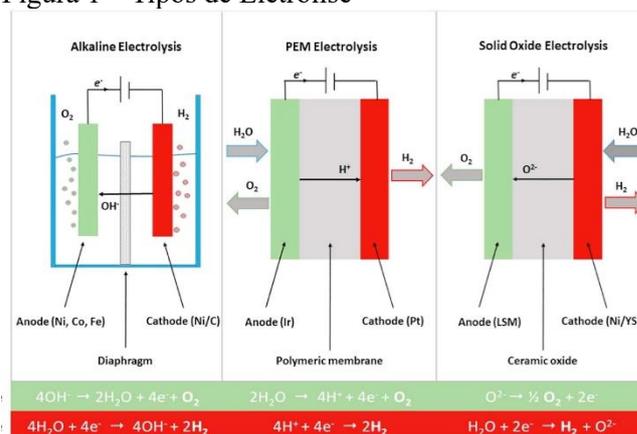


¹ Informação fornecida pelo Professor Doutor Jamil Haddad da Universidade Federal de Itajubá em 14 de setembro de 2023.

² Informação fornecida pelo Professor Doutor Ivan Felipe Silva dos Santos da Universidade Federal de Itajubá em 5 de setembro de 2023.

Existem vários tipos de eletrólise da água, entre eles: eletrólise alcalina da água (AWE); membranas de troca de prótons (PEM); membranas alcalinas de troca iônica (AEM); e eletrólise de água de óxido sólido (SOE), na figura 1 a seguir é possível observar como ocorrem as eletrólises alcalina, PEM e de óxido sólido, respectivamente.

Figura 1 – Tipos de Eletrólise



Fonte: Sapountzi et al. (2017).

Neste trabalho foi utilizada a eletrólise do tipo PEM. Isso porque a simulação dos custos para produzir o H₂V foi baseada nos equipamentos presentes no Centro de H₂V da Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), em que será instalado um eletrolisador utilizando tecnologia PEM (*Proton Exchange Membrane*) com 300 kW de potência, capaz de transformar energia elétrica gerada com fontes renováveis em 60 metros cúbicos de hidrogênio e 120 metros cúbicos de oxigênio por hora, consumindo cerca de mil litros de água por dia (informação verbal)¹.

A eletrólise feita por um eletrolisador do tipo PEM é indicada em pequena escala e foi introduzida na década de 1960, com o objetivo de superar as desvantagens da eletrólise alcalina. Este método possui as seguintes vantagens: operação flexível, alta densidade de potência

e eficiência celular e fornecimento de hidrogênio altamente comprimido e puro. No entanto, possui vida útil mais curta do que a AWE, os materiais do catalisador e a membrana fluoretada são ligeiramente mais caros do que os demais tipos de eletrólise, além de representar um sistema de alta complexidade devido à operação em alta pressão e exigir a pureza da água Schmidt et al. (2017). Neste caso, geralmente é utilizado como eletrólito uma membrana Nafion® (polímero de ácido perfluorossulfônico), para quebrar a molécula da água em oxigênio, prótons e elétrons no ânodo, por meio da aplicação de uma corrente contínua (CC) Barros et al. (2023).

A consultoria CELA (*Clean Energy Latin America*) publica semestralmente o índice de custos para produção de hidrogênio verde no Brasil, que atualmente está entre US\$ 2,87/kg e US\$ 3,56/kg. Porém, com otimização e incentivos, esses valores podem chegar até US\$ 1,69/kg, com custos altamente competitivos se comparados ao hidrogênio cinza que é produzido por fontes fósseis e poluentes. Este cálculo é feito com base no LCOH (Custo Nivelado do Hidrogênio), que contabiliza todos os custos operacionais e de capital da produção do hidrogênio. (CELA 2023).

Metodologia

Este trabalho é caracterizado como uma pesquisa exploratória e explicativa, com base em referências bibliográficas, estudos já realizados a respeito da produção do H₂V, valores de mercado e comercialização de energia solar e de H₂V, notas e laudos técnicos realizados na Universidade Federal de Itajubá, além de artigos e notícias. O objetivo principal é entender o papel do Hidrogênio Verde em descarbonizar os setores econômicos, levando em consideração a preocupação em atender a meta estabelecida no Acordo de Paris de zerar emissões líquidas de gases de efeito estufa (GEE) até 2050, a fim de limitar o aquecimento global a 1,5°C.

A simulação dos custos de produção do H₂V no CH₂V, foi feita a partir da eletrólise da água de dois poços artesianos e da captação da companhia de saneamento de Minas Gerais, presentes no Campus nas seguintes coordenadas:

- Poço 1: Coordenadas UTM: 453.917,15 – Leste e 7.521.236,48 – Norte
- Poço 2: Coordenadas UTM: 453.597,19 – Leste e 7.521.411,66 – Norte
- COPASA: Coordenadas UTM: 453.966,79 – Leste e 7.521.065,51 – Norte

¹ Informação fornecida pelo Professor Doutor Jamil Haddad da Universidade Federal de Itajubá em 14 de setembro de 2023.

² Informação fornecida pelo Professor Doutor Ivan Felipe Silva dos Santos da Universidade Federal de Itajubá em 5 de setembro de 2023.

Os dados de qualidade da água dos poços e da COPASA foram analisados em laboratório e organizados na tabela 1 a seguir.

Tabela 1 – Análise da Qualidade da Água dos pontos de coleta da UNIFEI

Parâmetro	Unidade	Locais de Amostragem (UNIFEI)			Ordinanc+A1:F40e GM/MS nº 888, of 05/04/21
		Poço 1	Poço 2	COPASA	
Cloro Residual Livre	mg/L	0.11	0.08	0.67	5
Odor	-	odorless	odorless	odorless	Intensidade 6
pH	-	6.45	6.43	6.50	06/set
Temperatura	°C	21.1	21.0	21.3	Sem limite
Alcalinidade	mg/L	34.5	40.5	13.2	Sem limite
Cianeto Total	mg/L	<0.02	<0.02	<0.02	Sem limite
Chloride	mg/L	<0.1	<0.1	1.47	250
Cundutividade Elétrica	µS/cm	187.9	478.6	106.8	Sem limite
Cor Aparente	mg Pt-Co/L	<5	<5	<5	15
DBO	mg/L	<0.2	<0.2	<0.2	Sem limite
DQO	mg/L	<0.5	<0.5	<0.5	Sem limite
Fluoreto	mg/L	0.93	0.31	0.2	1.5
Nitrato	mg/L	<0.1	<0.1	0.43	10
Nitrito	mg/L	<0.02	<0.02	<0.02	1
o-Fosfato	mg/L	<0.1	<0.1	<0.1	Sem limite
Sólidos Dissolvidos	mg/L	100	281	58	500
Sólidos Fixos Totais	mg/L	115	272	42	Sem limite
Sólidos Voláteis Totais	mg/L	26	31	45	Sem limite
Sulfato	mg/L	<0.1	73.4	<0.1	250
Turbidez	UNT	0.1	0.4	0.2	5
Antimônio	mg/L	<0.005	<0.005	<0.005	0.006
Arsênio	mg/L	<0.005	<0.005	<0.005	0.01
Bário	mg/L	<0.1	<0.1	<0.1	0.7
Cádmio	mg/L	<0.0005	<0.0005	<0.0005	0.003
Cálcio Total	mg/L	10.7	44.6	6.16	Sem limite
Chumbo	mg/L	< 0.005	< 0.005	< 0.005	0.01
Cobre Total	mg/L	<0.005	<0.005	<0.005	2
Cromo	mg/L	<0.01	<0.01	<0.01	0.05
Dureza do Cálcio	mg/L	26.7	111.4	15.4	Sem limite
Dureza Total	mg/L CaCO ₃	28.4 (SW)	114.4 (SHW)	16.7 (SW)	300
Ferro Total	mg/L	0.17	0.2	0.19	0.3
Magnésio Total	mg/L	0.41	0.73	0.32	Sem limite
Manganês	mg/L	<0.05	<0.05	<0.05	0.1
Mercurio	mg/L	< 0.0002	< 0.0002	< 0.0002	0.001
Potássio Total	mg/L	1.72	1.91	0.77	Sem limite
Selênio Total	mg/L	<0.01	<0.01	<0.01	0.04
Silica Total	mg/L	40.5	34.7	7.59	Sem limite
Sódio Total	mg/L	3.95	12.5	1.71	200
Matéria Orgânica	mg/L	26	31	45	Sem limite
Carbono Orgânico Total	µg/L	0.015	0.017	0.026	

Legenda:
SW (soft water)
SHW (slightly hard water)

Fonte: Barros et. al. (2023)

A partir das análises realizadas em laboratório por Barros et al. (2023) e das informações a respeito do CH₂V da UNIFEI (informação verbal) ¹, utilizou-se a fórmula do LCOH (informação verbal) ² disponível na equação 5 a seguir.

$$LCOH = \frac{INV + \sum_{t=1}^{m=20} \frac{CA}{(1+i)^t}}{\sum_{t=1}^{m=20} \frac{mH2}{(1+i)^t}} \quad (5)$$

Onde:

INV: Investimentos na fase CAPEX da produção de H₂V

m: vida útil

CA: custos totais para a produção do H₂V

mH₂: massa de H₂V produzida em kg

i: taxa de juros

t: tempo em ano

(informação verbal) ²

Para este estudo foi considerado que o projeto de produção do H₂V no CH₂V terá vida útil de 20 anos.

Resultados e discussão

A partir das informações de funcionamento dos eletrolisadores (informação verbal)¹, juntamente com o levantamento de custos de investimento encontrados na literatura e da equação 5, estimou-se o valor do LCOH para a produção de Hidrogênio Verde no CH₂V da Universidade e os resultados podem ser consultados na tabela 2 a seguir.

Tabela 2 – Cálculo do LCOH para a produção do H₂ no CH₂V da UNIFEI

Parâmetro	Valor	Unidade
H ₂ Produzido	53,928	kg/dia
H ₂ Produzido	19.683,72	kg/ano
Potência do parque solar	500	kW
Cun da E Solar Fotovoltaica	2800	R\$/kW
Custo total da usina Fotovoltaica	1.400.000,00	R\$
Custo dos eletrolisadores	3.108.582,00	R\$
Investimento	4.508.582,00	R\$
Custo de op e manut. (Com)	107.257,46	R\$/ano
Taxa de desconto	10%	
LCOH	32,35	R\$/kg
LCOH	6,64	U\$/kg
Custo de Operação e manutenção		
Usina solar fotovoltaica	1 % do investimento	
Eletrolisadores	1 a 3 % do investimento	

Fonte: Autora

Vale destacar que o dimensionamento do parque solar levou em consideração a potência em kW consumida pelo eletrolisador PEM. O custo de implantação deste parque foi baseado no Caderno de Parâmetros de Custos – Geração e Transmissão da “epe” (Empresa de Pesquisa Energética). Já o custo dos eletrolisadores foi baseado em pesquisa de preço de mercado do Eletrolisador do tipo PEM e o custo de operação e manutenção leva em consideração as faixas percentuais indicadas na tabela 2. Ao comparar o LCOH da produção de H₂V na Universidade (6,64 U\$/kg) com o LCOH do Brasil apresentado pela CELA (2,87 – 3,56 U\$/kg), percebe-se que o calculado é cerca de duas vezes maior do que o indicado pela CELA. Isso pode ser justificado pelo fato de o estudo ser realizado com base em estimativas de valores e estar desconsiderando incentivos externos à produção, além de que o porte da produção da Universidade será pequeno em relação ao que já é produzido no país. Outra justificativa pode ser devido ao tipo de eletrólise escolhido para a produção, já que a eletrólise do tipo PEM é um pouco mais cara do que as

demais por utilizar metais nobres nos eletrodos.

Conclusões

A partir das pesquisas realizadas e considerando o papel importante do H₂V na profunda descarbonização dos setores, pode-se dizer que o Hidrogênio Verde tem grande potencial nas reduções de GEE, por ser um combustível considerado limpo e proveniente de fonte de energia renovável.

No entanto, ao levar em consideração os resultados encontrados na simulação de custo de produção do H₂V, conclui-se que a produção de H₂V na Universidade está diante de um mercado em formação e aquecido. Todavia é importante destacar que os estudos que vêm sendo realizados proporcionam um cenário bastante otimista, uma vez os demais países e algumas empresas vêm demonstrando interesse em subsidiar projetos e estudos a respeito de técnicas que venham baratear a produção do H₂V na Universidade e no Brasil em geral.

Por fim, pode-se dizer que o objetivo deste trabalho foi alcançado, visto que as pesquisa e estudos possuem a finalidade de analisar cenários e situações que possam tornar os custos de produção mais acessíveis.

Agradecimentos

Agradeço à professora Dra. Regina Mambeli Barros pela orientação, aos professores Rafael Silva Capaz e Ivan Felipe Silva dos Santos, pela coorientação e disponibilidade, à UNIFEI e a FAPEMIG pela oportunidade de desenvolver esta pesquisa.

Referências

- BARROS, R. M.; RIOS, L. G.; RODRIGUES, M. R. B. Water quality required for the production of green hydrogen from water electrolysis. Technical Note. 2023
- BEZERRA, Francisco Diniz. Hidrogênio verde: nasce um gigante no setor de energia. Fortaleza: Banco do Nordeste do Brasil, ano 6, n.212, dez. 2021. (Caderno Setorial ETENE)
- NETO, Roberto Liberato. Geração e combustão do hidrogênio obtido através do Processo de eletrólise da água. São Paulo, 2007.
- SCHMIDT, O.; GAMBHIR, A.; STAFFELL, I.; HAWKES, A.; NELSON, J.; FEW, S. Future cost and performance of water electrolysis: An expert elicitation study, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 42, n. 52, 2017, p. 30470-30492, ISSN 0360-3199, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.10.045>

¹ Informação fornecida pelo Professor Doutor Jamil Haddad da Universidade Federal de Itajubá em 14 de setembro de 2023.

² Informação fornecida pelo Professor Doutor Ivan Felipe Silva dos Santos da Universidade Federal de Itajubá em 5 de setembro de 2023.

SHI, Xunpeng; LIAO, Xun; LI, Yanfei. Quantification of freshwater consumption and scarcity footprints of hydrogen from water electrolysis: A methodology framework, *Renewable Energy*, Vol. 154, 2020, p. 786-796, ISSN 0960-1481, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.03.026>

SIMOES, Sofia G.; CATARINO, Justina; STINGED, Anne; LOPES, James F.; DI BERARDINO, Santino; AMORIM, Filipa; SLANG, Francis; RANGEL, C.M.; LEO, Teresa Ponce. Water availability and water usage solutions for electrolysis in hydrogen production, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 315, 2021, 128124, ISSN 0959-6526, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128124>

ZHANG, X.; CHAN, S. H.; HO, H. K.; TAN, S-C.; LI, M.; LI, G.; LI, J.; FENG, Z. Towards a smart energy network: the roles of fuel/electrolysis cells and technological perspectives. *Int J Hydrogen Energy* 2015;40: 6866-919, <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2015.03.133>.

¹ Informação fornecida pelo Professor Doutor Jamil Haddad da Universidade Federal de Itajubá em 14 de setembro de 2023.

² Informação fornecida pelo Professor Doutor Ivan Felipe Silva dos Santos da Universidade Federal de Itajubá em 5 de setembro de 2023.