

Renováveis

ENERGIAS COMPLEMENTARES

Ano 5 - Edição 73 / Outubro de 2023



Editorial

Capítulo VII

Eletrolisadores: opções tecnológicas e novas tecnologias

APOIO





FASCÍCULO HIDROGÊNIO VERDE

Por Marcos Fábio V. Montezuma e Enio Pontes de Deus*

Capítulo VII

ELETROLISADORES: OPÇÕES TECNOLÓGICAS

E NOVAS TECNOLOGIAS

36

A ELETRÓLISE DA ÁGUA

Entre as formas de produção do hidrogênio, a eletrólise da água se destaca pela possibilidade de ser realizada sem que haja qualquer emissão de CO₂ no seu processo. Este procedimento tem como objetivo a quebra da ligação da molécula da água, dando origem aos subprodutos hidrogênio e oxigênio. No entanto, o processo de eletrólise necessita de energia para ser realizado e implica no grande consumo de eletricidade por parte dos eletrolisadores, aumentando, conseqüentemente, o custo de produção do hidrogênio e dificultando sua competitividade diante de outras tecnologias. Ocorre que, se forem utilizadas fontes de energia renováveis, o processo torna-se rentável e sustentável, uma vez que o gás hidrogênio tem capacidade de armazenar energia. De acordo com o relatório do BNDES (2022), em 2020, foram produzidas 87 milhões de toneladas de hidrogênio puro, praticamente tudo derivado de combustíveis fósseis e menos de 0,1% dessa produção foi oriunda da eletrólise da água.

COMO FUNCIONAM OS ELETROLISADORES

Um eletrolisador é um dispositivo capaz de quebrar as moléculas da água em átomos de oxigênio e de hidrogênio. Consiste em um empilhamento de eletrodos condutores separados por eletrólitos aos quais se aplica uma voltagem de intensidade controlada. Isso provoca uma corrente elétrica na água, o que faz com que seus componentes se decomponham. Quando a eletricidade utilizada na eletrólise é proveniente de fontes renováveis, como a eólica e solar, pode-se considerar que o hidrogênio foi produzido de

forma totalmente limpa, sem nenhuma emissão associada. A esta forma de produção tem-se dado, mundialmente, a denominação de hidrogênio verde ou renovável. O sistema completo de um eletrolisador também inclui bombas, eletrônica de potência, separadores de gases e outros componentes auxiliares, como os tanques de armazenamento. O oxigênio gerado em paralelo é liberado na atmosfera ou pode ser armazenado para ser usado posteriormente como gás medicinal ou industrial. O hidrogênio, por sua vez, é armazenado como gás comprimido ou liquefeito para ser usado na indústria ou em pilhas a combustível de hidrogênio, podendo alimentar com eletricidade meios de transporte, tais como trens, embarcações e aviões.

CLASSIFICAÇÃO E TIPOS DE ELETROLISADORES

Os eletrolisadores podem ser classificados quanto ao tipo de eletrólito, temperatura de operação e estado do eletrólito (líquidos ou sólidos). Quanto ao tipo de eletrólito, existem atualmente quatro principais tecnologias: a alcalina (A); com membrana de troca de prótons (PEM); as células de eletrólise de óxido sólido (SOEC) e com membrana de troca de ânions (AEM). Os eletrolisadores que operam na faixa de 80 °C são considerados de baixa temperatura, enquanto os que operam acima de 500 °C são considerados de alta temperatura. É importante ressaltar que a escolha do tipo de eletrolisador deve atender a alguns requisitos prévios, como: o tipo de aplicação, condições de operação, custo, impacto ambiental, tipo de recurso energético, disponibilidade comercial, manutenção, bem como a disponibilidade de assistência técnica e treinamento.



ELETROLISADORES ALCALINOS

A eletrólise alcalina (Figura 1) é a mais empregada nos dias atuais. Estes eletrolisadores utilizam uma solução alcalina como eletrólito, geralmente hidróxido de potássio (KOH) com concentrações mássicas de 25% a 30%. Operam em baixas temperaturas, variando de 65 °C a 100 °C; a pressão é frequentemente em torno de 25-30 bar, mas existem modelos que operam à pressão atmosférica e outros que podem chegar até a 448 bar (alcalinos de alta pressão). A densidade de corrente de eletrolisadores alcalinos industriais encontra-se na faixa de 1000-3000 A/m². Os sobrepotenciais e as perdas ôhmicas aumentam com o aumento da densidade de corrente, reduzindo a eficiência deste tipo de eletrólise devido à transformação da energia elétrica em calor.

O hidrogênio é produzido em uma célula constituída por um ânodo, um cátodo e um diafragma. As células costumam ser montadas em série para produzir mais hidrogênio e oxigênio ao mesmo tempo. Quando a corrente é aplicada na pilha eletrolítica, os íons hidróxidos se movem através do eletrólito do cátodo para o ânodo de cada célula, gerando bolhas de gás hidrogênio no lado do cátodo do eletrolisador e gás oxigênio no ânodo. Trata-se de uma tecnologia madura, utilizada desde a década de 1920 em indústrias como a do cloro. Apresenta custos de produção mais baixos que as demais tecnologias de eletrolisadores e não requer a utilização de metais preciosos na sua fabricação (BNDES, 2022). A eletrólise alcalina tem pouco potencial para grandes reduções de custos, sendo seus desafios tecnológicos bastante restritos. (MACFARLANE et al., 2020).

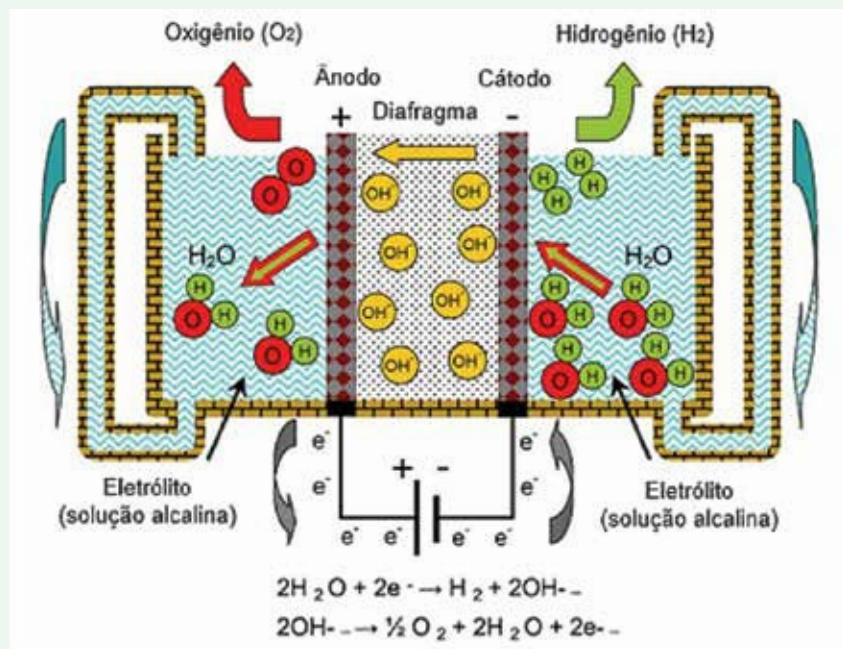


Figura 1 - Esquema de eletrólise alcalina. Fonte: Ursúa et. al, 2012.

ELETROLISADORES COM MEMBRANA DE TROCA DE PRÓTONS (PEM)

Ao contrário da eletrólise alcalina, a tecnologia PEM apresenta possibilidades de reduções de custos, podendo ocupar menor espaço, propiciar uma operação mais flexível e ter pressão de saída mais alta do que na eletrólise alcalina. Todavia, é uma tecnologia menos madura, mais cara e ainda apresenta menor vida útil. Os eletrolisadores tipo PEM (Figura 2) têm como principal elemento a presença de uma membrana, também chamada de eletrólito polimérico sólido (ácido), separando o cátodo e ânodo (SALEHMIN et al., 2022). São considerados de baixa

As melhores soluções em materiais elétricos de média tensão a Exponencial disponibiliza para o mercado.



- X Luminárias públicas LED;
- X Cabos de cobre nu, flexíveis e isolados;
- X Preformados;
- X Cabos de alumínio nu, multiplexados, protegidos e isolados;
- X Isoladores, chaves, para-raios, cruzetas, dutos corrugados;
- X Rede de distribuição aérea e subterrânea.

(31) 3317-5150

Rua Titânio 153 - Camargos - BH/MG
vendas@exponencialmg.com.br

exponencialmg

www.exponencialmg.com.br

Produtor Homologados CEMIG

Compre com seu cartão
BNDES



temperatura, com temperaturas de operação variando entre 80 °C e 150 °C e pressões de até 400 bar. Os eletrodos podem ser construídos de materiais diversos, desde que apresentem excelente estabilidade química e alta condutividade, já que a corrente elétrica é a responsável indireta pela quebra das moléculas de água para a produção dos gases hidrogênio e oxigênio. Para a construção de um eletrolisador PEM, três fatores primordiais devem ser considerados: o desempenho, a durabilidade e o custo. Quando a corrente é aplicada na célula, a água se divide em hidrogênio e oxigênio e os prótons do hidrogênio passam através da membrana para formar gás hidrogênio no lado do cátodo. Produzem hidrogênio com alto grau de pureza e são fáceis de refrigerar. Em contrapartida, são um pouco mais caros, pois utilizam metais preciosos como catalisadores. No futuro, o desenvolvimento tecnológico e o ganho de escala poderão tornar os eletrolisadores PEM dominantes em relação aos alcalinos.

38

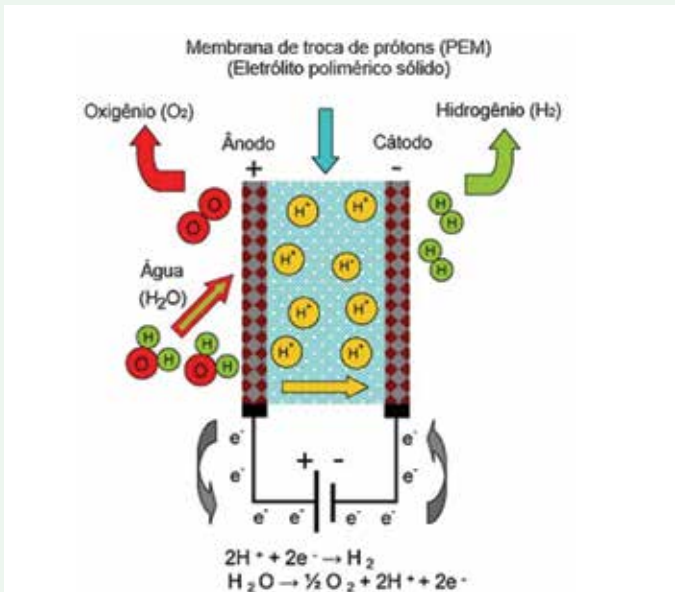


Figura 2 - Esquema de eletrólise com membrana de troca de prótons PEM. Fonte: Ursúa et. al, 2012.

ELETROLISADORES DE ÓXIDO SÓLIDO (SOEC)

As tecnologias de células de eletrólise de óxido sólido SOEC estão em fase de desenvolvimento, mas apresentam futuro promissor na produção de hidrogênio devido à alta eficiência de conversão de energia e menores custos de investimento (IEA, 2022c). Os SOEC funcionam em altas temperaturas (entre 500 °C e 1000 °C); pressão de até 30 bar, e têm o potencial de serem muito mais eficientes que os PEM e os alcalinos. O processo se denomina eletrólise de alta temperatura (HTE) ou eletrólise do vapor de água e utiliza um material cerâmico sólido como eletrólito, como a zircônia estabilizada com ítria cerâmica (YSZ), devido à sua estabilidade química e à sua propriedade de condução iônica seletiva (O₂⁻) em alta temperatura. Os elétrons do circuito externo são combinados com a água no cátodo para formar o gás hidrogênio e os íons de carga negativa (Figura 3). O oxigênio então passa através da membrana cerâmica deslizante e reage no ânodo para formar gás oxigênio e gerar elétrons para o circuito externo.

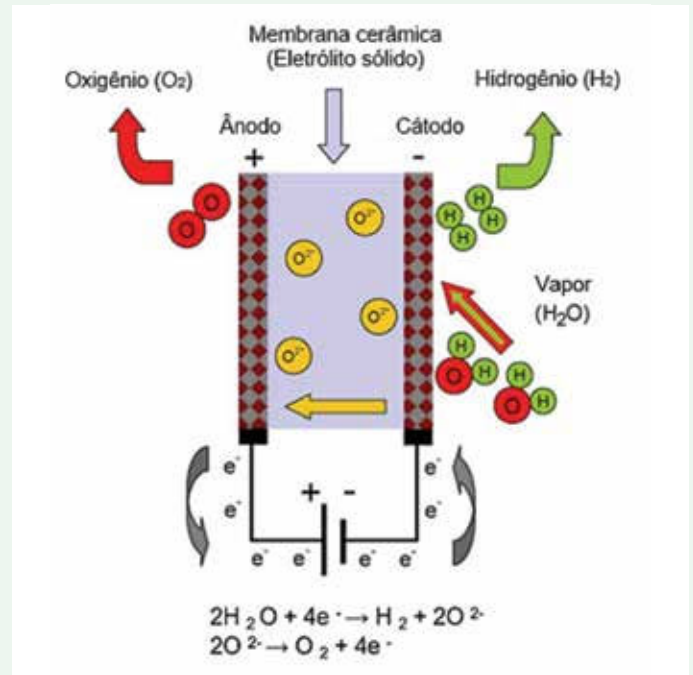


Figura 3 - Esquema de eletrólise de óxido sólido (SOEC). Fonte: Ursúa et al, 2012.

ELETROLISADORES DE MEMBRANA DE TROCA DE ÂNIONS (AEM)

Os eletrolisadores AEM utilizam uma membrana semipermeável que conduz íons hidróxido (OH⁻), chamada membrana de troca aniônica. Assim como uma membrana de troca de prótons PEM, a membrana separa o cátodo e ânodo, fornecendo isolamento elétrico entre os eletrodos e conduzindo íons. Ao contrário do eletrolisador PEM, o AEM conduz íons hidróxidos (Figura 4). A principal vantagem da eletrólise AEM é que não é necessária a utilização de um catalisador de metal nobre de alto custo. Em vez disso, um catalisador de metal de transição de baixo custo pode ser usado. Operam em temperaturas significativamente

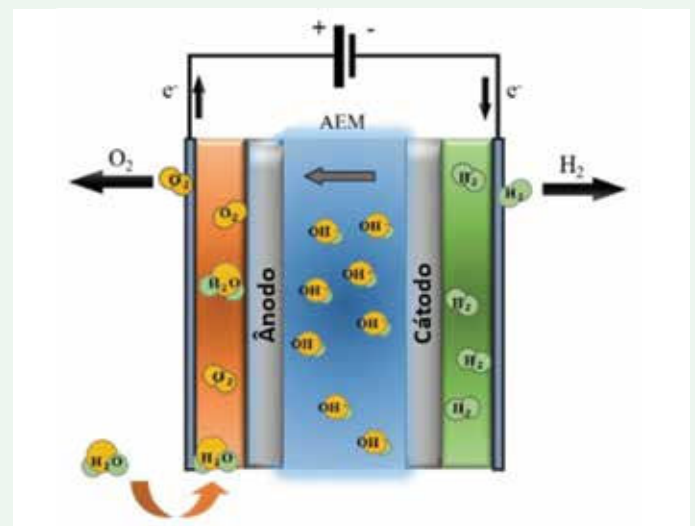


Figura 4 - Esquema de eletrólise de membrana de troca aniônica. Fonte: Vicente, 2021.

Cobrecom

Sua marca de
confiança



Quem vive o mercado de fios e cabos de cobre sabe a responsabilidade que tem, já que um erro pode ser fatal. Por isso, trabalhar com uma marca de confiança não pode ser uma opção, e sim regra. História sólida, controle nos processos de fabricação e garantia de pureza do cobre são alguns itens que fazem uma marca ser de confiança, e nós oferecemos todos eles. Quem entrega o melhor merece Cobrecom.



Acesse
www.cobrecom.com
ou escaneie o código
para mais informações.



TABELA 1 - COMPARAÇÃO ENTRE ELETROLISADORES (ANÁLISE CEEW-CEF BASEADA EM MÚLTIPLAS FONTES *[1], [2], [3])

Parâmetro	ALCALINO	PEM	SOEC	AEM
Eletrólito	Solução de Hidróxido de potássio	Membranas PFSA (Ex. Nafion)	YSZ	Membrana de troca aniônica
Cátodo	Ni, Ligas de Ni-Mo	Platina, Liga Platina-Paládio	Ni/YSZ	Ni, Ligas de Ni
Ânodo	Ni, Ligas de Ni-Co	Óxido de Rutênio, Óxido de Iridio	YSZ	Ni, Fe, Óxidos de Co
Temperatura de operação (°C)	65-100	80-150	500-1000	50-60
Pressão de operação (bar)	25-30	70-400	1-30	1-30
Densidade de potência (mW/cm ²)	<1	<4,4	-	-
Vida útil da célula (h)	60-100k	20-60k	<10k	-
Tecnologia	Madura	Comercialização	Desenvolvimento	Pesquisa e desenvolvimento
Vantagens	Acessível a projetos de grandes plantas, baixo custo e alta vida útil	Sem substâncias corrosivas, alta densidade de potência, altas pressões	Alta eficiência elétrica	-
Desvantagens	Baixa densidade de potência, custo com manutenção (sistema altamente corrosivo)	Alto custo e rápida degradação	Estabilidade limitada das células, não adequado para sistemas flutuantes, Alto custo	-
Produção de H2 (m ³ /h)	< 760	até 450	-	-
Tensão na célula (V)	1,8-2,4	1,8-2,2	0,91-1,3	-
Custo	USD 500-1400/kW	USD 1100-1800/kW	USD 2800-5600/kW	-

40

mais baixas de 50 °C a 60 °C e uma faixa de pressão de 1 bar a 30 bar. De todos os métodos de eletrólise da água, a eletrólise AEM pode combinar as vantagens da eletrólise alcalina da água e da eletrólise PEM. Entretanto, a eletrólise AEM ainda está no estágio inicial de pesquisa e desenvolvimento. O principal desafio técnico enfrentado por um eletrolisador AEM é a baixa durabilidade da membrana, o que implica numa curta vida útil do eletrolisador.

A Tabela 1 exibe uma comparação entre os tipos de eletrolisadores (Tabela 1), com as vantagens e desvantagens de cada tecnologia.

PRODUÇÃO DE ELETROLISADORES

Em 2020, a cadeia produtiva de eletrolisadores contava com a capacidade global de fabricação de, aproximadamente, 3 GW/ano, com a tecnologia alcalina representando 85% e a PEM, pouco menos de 15%, além de fabricação artesanal muito pequena de SOECs e AEMs. A maior parcela da capacidade produtiva mundial de eletrolisadores está concentrada na Europa (60%) e na China (35%) (IEA, 2021d). Segundo a agência, empresas como Thyssenkrupp, Nel Hydrogen, ITM, McPhy, Cummins e John Cockerill anunciaram planos para expandir suas capacidades de fabricação. A capacidade global de fabricação poderia chegar a aproximadamente 20 GW/ano, gerando reduções de custos para a tecnologia. Ainda assim, os números seriam insuficientes. A IEA projeta a necessidade de uma capacidade produtiva de 90 GW/ano para o alcance das metas existentes no cenário NZE (Net Zero Emissions), indicando a existência de um gap importante que poderá impedir a implantação

dos projetos de produção de hidrogênio no tempo necessário para o atendimento aos objetivos de descarbonização globais (IEA, 2021d).

O crescimento da demanda por alguns minerais será uma consequência gerada pelo aumento da produção de eletrolisadores, que poderá se traduzir em desafios para a cadeia de suprimentos. A eletrólise alcalina requer a utilização de níquel em quantidades de 800 a 1000 t/GW de eletrolisador com a tecnologia atual (IEA, 2021d). No cenário NZE da IEA, caso a eletrólise alcalina domine o mercado até 2030, haverá demanda de 72 mil t/ano de níquel. Ainda assim, a agência ressalta que essa quantidade é bastante inferior ao consumo projetado para utilização na fabricação de baterias. Já a produção de eletrolisadores do tipo PEM demanda 300 kg de platina e 700 kg de irídio por GW. Caso os eletrolisadores PEM abasteçam toda a produção de eletrolisadores em 2030, no cenário NZE, a demanda por irídio será de 63 mil t/ano, o que representa nove vezes a produção global atual (IEA, 2021d). No entanto, a agência pondera que a demanda por irídio e platina pode ser reduzida por um fator de dez na próxima década e a reciclagem de células eletrolisadoras PEM pode reduzir ainda mais a demanda primária por esses metais, concentrada na Europa (60%) e na China (35%) (IEA, 2021d).

NOVAS TECNOLOGIAS

Um dos principais desafios para tornar a eletrólise economicamente viável é o desenvolvimento de infraestrutura e tecnologias de menor custo, aumentando a eficiência do processo de conversão da energia

elétrica em H2V, diminuindo a tensão da célula, melhorando as condições de densidade de energia, controle de pressão e temperatura, e desenvolvimento de novos materiais da membrana e canais. Neste contexto, novas tecnologias têm surgido dia após dia.

TECNOLOGIAS DE MONTAGEM DOS ELETROLISADORES

Ao longo dos anos, ocorreu um avanço considerável em relação à montagem e construção dos eletrolisadores. Uma grande evolução ocorreu na década de 1970, com a redução da distância entre os eletrodos. Nos projetos zero-gap, os eletrodos são separados apenas por um diafragma ou membrana que separa os gases, fazendo com que a resistência interna da célula de eletrólise fosse reduzida consideravelmente, aumentando a eficiência. Outro importante avanço foi a forma de montagem dos eletrolisadores em sistemas modulares integrados (clusters), de forma que a produção total de hidrogênio seja produzida conforme a disponibilidade de entrada de energia. Neste tipo de montagem, vários pequenos eletrolisadores são acoplados e, caso ocorra a parada de um dos eletrolisadores, a produção não é interrompida. Sistemas de secagem podem também ser integrados aos eletrolisadores para aumentar a pureza do hidrogênio a 99,999%.

DESENVOLVIMENTO DE NOVOS MATERIAIS PARA MEMBRANAS (PEM)

Conforme MELO, S. [2023], atualmente, membranas baseadas no ácido perfluorossulfônico (PFSA), como as de Nafion™ da DuPont, são utilizadas em células de eletrólise PEM. As principais características destas membranas para a produção de hidrogênio são: trabalham sob altas densidades de corrente e baixas tensões; operam em uma ampla faixa de temperatura; só precisam de água e não produtos químicos cáusticos perigosos no eletrólito; altíssima resistência e durabilidade. Porém, desvantagens como, alto custo, baixa condutividade em condições anídras e a não sustentabilidade, são fatores determinantes para sua substituição. Em estudo realizado no LAMEFF da Universidade Federal do Ceará, Melo propôs a utilização de membranas compósitas de quitosana, com adição de nanocelulose e óxido de grafeno para melhoria das suas propriedades mecânicas e elétricas, como alternativa às membranas comerciais existentes. Outras grandes empresas têm desenvolvido novos materiais de membrana, visando alcançar alta eficiência e redução de custos no processo de produção de hidrogênio verde.

SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DO PROCESSO DE ELETRÓLISE

As simulações numéricas através do método dos volumes finitos (FVM) e método dos elementos finitos (FEM) têm se tornado ferramentas fundamentais na transição tecnológica para a energia renovável, auxiliando na resolução e otimização de problemas relacionados à conservação de energia, momento e massa, e na superação dos desafios

associados ao hidrogênio, levando em conta o custo e escala (Figura 5). Normalmente, a eletrólise da água produz hidrogênio e oxigênio gasosos em dispositivos de eletrólise, o que os torna sistemas fluidos multifásicos gás-líquido. Nestas análises podemos simular as curvas de polarização ou curvas características do eletrolisador [densidade de corrente x tensão aplicada]. Para a análise de modelos multifásicos de mistura, são usados softwares de CFD (computational fluid dynamics).

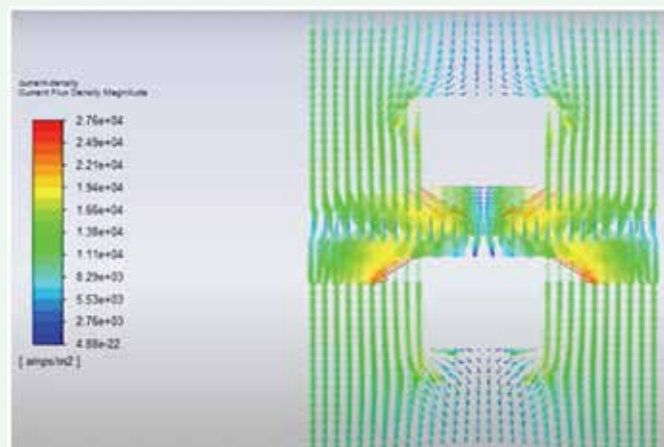


Figura 5 - Simulação computacional de densidade de corrente em uma célula de eletrólise PEM (Ansys). Fonte: Lameff, (2023).

41

TECNOLOGIAS INOVADORAS - R&D 100 AWARDS HONOR LAB INNOVATIONS, 2022

Duas tecnologias inovadoras vinculadas ao consórcio HydroGEN Advanced Water Splitting Materials foram homenageadas com o prêmio R&D 100, 2022 da revista R&D World. São elas:

- Catalisador livre de PGM (Platinum Group Metal) como substituição de irídio para eletrolisadores tipo PEM

No processo de eletrólise em baixa temperatura com eletrolisador tipo PEM, o hidrogênio é produzido pela combinação de prótons e elétrons no cátodo, enquanto a água é oxidada para formar oxigênio através do OER (Oxygen Evolution Reaction) no ânodo, promovido por um catalisador. O catalisador inovador da Argonne para esta reação é baseado em óxido de cobalto com uma estrutura nanofibrosa, altamente porosa. Ele pode, potencialmente, substituir o caro metal do grupo da platina (PGM), o irídio, agora em uso como catalisador. A escassez de irídio acrescenta um custo significativo ao eletrolisador de água PEM. O catalisador deverá custar cerca de 2.000 vezes menos do que o catalisador comercial à base de irídio. Ao reduzir a barreira de custos para a eletrólise da água, a tecnologia poderá viabilizar a produção generalizada de "hidrogênio verde". (Argonne, 2022).

- Gerador solar de combustível incluindo uma malha catalítica

O Laboratório Nacional Lawrence Berkeley desenvolveu um dispositivo fotoeletroquímico, SolarCatMesh, que usa a luz solar para converter diretamente água em hidrogênio e oxigênio. Este dispositivo



modular e autônomo (Figura 6) pode produzir hidrogênio limpo em praticamente qualquer lugar, sem necessidade de rede elétrica ou infraestrutura de produção em grande escala.

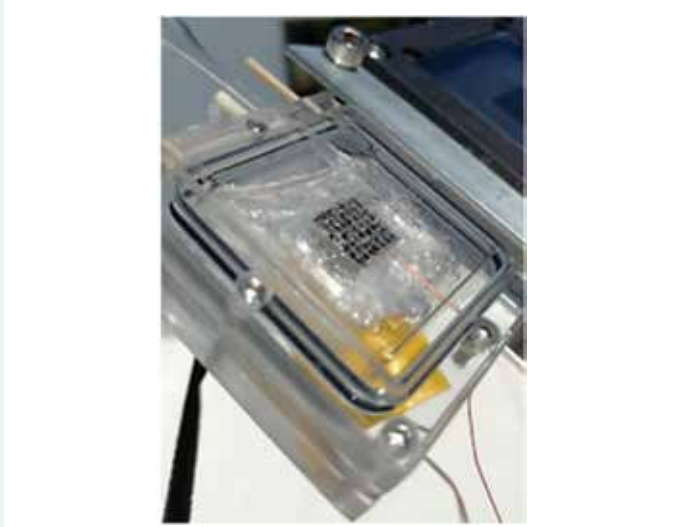


Figura 6 - Dispositivo fotoeletroquímico. Fonte: Berkeley Lab (2022).

CONCLUSÃO

Muitos esforços em pesquisa e desenvolvimento estão em andamento para a queda nos custos de energia renovável e a melhoria das tecnologias dos eletrolisadores. Desta forma, espera-se tornar o custo do hidrogênio verde competitivo até 2030.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BNDES, *Hidrogênio de baixo carbono: oportunidades para o protagonismo brasileiro na produção de energia limpa; disponível em formato digital em www.bndes.gov.br/bibliotecadigital, 2022;*
- MACFARLANE, D. R. et al. *A roadmap to the ammonia economy. Joule, Cambridge, v. 4, n. 6, p. 1186-1205, 2020. Disponível em: <https://www.cell.com/action/showPdf?pii=S2542-4351%2820%2930173-2>;*
- MELO, S. *Compósitos de quitosana aditivados com nanocelulose e óxido de grafeno (GO) para produção de membranas de troca protônica. Tese (Doutorado em Processos de degradação e transformação dos materiais) – Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2023;*
- SALEHMIN, Mohd Nur Ikmal et al. *High-pressure PEM water electrolyser: A review on challenges and mitigation strategies towards green and low-cost hydrogen production. Em. Conv and Manag. [S.l.]: Elsevier Ltda 15 set. 2022;*
- IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. *Net Zero by 2050: a roadmap for the global energy sector. Paris: IEA, 2021d. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>;*
- IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. *The role of critical minerals*

in clean energy transitions. Paris: IEA, 2022c. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions>;

- URSÚA, A. *Hydrogen production with alkaline electrolyzers: Electrochemical modelling, electric power supplies and integration with renewable energies, Ph.D. dissertation, Dept. Electr. Electron. Eng., Public University. Navarra, Pamplona, Spain, 2010;*
- Vágner, Petr & Guhlke, Clemens & Miloš, Vojtěch & Müller, Rüdiger & Fuhrmann, Jürgen. *A continuum model for yttria-stabilized zirconia incorporating triple phase boundary, lattice structure and immobile oxide ions. Journal of Solid State Electrochemistry. 23. 10.1007/s10008-019-04356-9, 2019;*
- VICENTE, I., LEE, E. C., KIM, H. M. *Comprehensive impedance investigation of low-cost anion exchange membrane electrolysis for large-scale hydrogen production. Rep Sci 11, 293 [2021]. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-80683-6>;*
- [1] AIE. 2022. "Eletrolisadores". Paris: Agência Internacional de Energia. <https://www.iea.org/reports/electrolyser>;
- [2] Lavacchi, Alessandro, Karel Bouzek, Jaromír Hnát, Stefan Loos, Christian Immanuel Müller, Thomas Weißgärber, Lars Röntzsch e Jochen Meier-Haack. 2020. "Hidrogênio verde da eletrólise da água da membrana de troca de ânions: uma revisão dos desenvolvimentos recentes em materiais críticos e condições operacionais." *Energia e Combustíveis Sustentáveis 4 [5]: 2114-33. <https://doi.org/10.1039/c9se01240k>;*
- [3] Kumar, Sanjay e V. Himabindu. 2019. "Produção de hidrogênio por eletrólise da água PEM – Uma revisão." *Ciência dos Materiais para Tecnologias de Energia 2 [3]: 442-54. <https://doi.org/10.1016/j.mset.2019.03.002>.*

* Marcos Fábio Veríssimo Montezuma é Engenheiro Mecânico pela Universidade Federal do Ceará (UFC), especialista em Metalurgia (UFF/USP) e em Simulação Computacional, possui Mestrado e Doutorado em Engenharia e Ciência de Materiais pela UFC. Tem experiência de 20 anos na Indústria do Petróleo, Gás e Distribuição de Combustíveis, ocupando a função de EV Sênior na empresa Vibra Energia S.A. Contribui como pesquisador do LAMEFF – Laboratório de Mecânica da Fratura, Fadiga e Materiais da Universidade Federal do Ceará.

* Enio Pontes de Deus é Engenheiro Civil pela Universidade Federal do Ceará (UFC), Mestre em Engenharia Civil pela PUC-RJ e Doutor em Engenharia Estrutural pela Universidade de São Paulo/ Technische Universität Braunschweig (TU-BS) Alemanha. Atualmente, é professor Titular do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Ceará e coordenador do LAMEFF - Laboratório de Mecânica da Fratura, Fadiga e Materiais da Universidade Federal do Ceará. É ainda diretor de Ciência e Tecnologia do PROIFES – Federação, coordenador do Projeto Hidrogênio Verde FUNCAP desde 2021 e coordenador do Projeto Hidrogênio Verde - Parque Tecnológico (PARTEC) desde 2022.