

Eletrólise da água: sustentabilidade, tecnologias e aplicabilidade do hidrogênio para a redução do aço

Water electrolysis: sustainability, technologies and applicability of hydrogen for steel reduction

¹ Shimeni Baptista Ribeiro  

¹ Edmar Moreira  

¹ Gabriel Arvellos  

¹ Pedro Lima  

¹ Lucas Moraes Moraes  

¹ UniFOA - Centro Universitário de Volta Redonda

RESUMO

O aumento das emissões de carbono e a busca por soluções sustentáveis para a mitigação dos impactos ambientais têm impulsionado o desenvolvimento de tecnologias limpas. O presente estudo tem como objetivo apresentar as atuais tecnologias de eletrólise da água para a produção de hidrogênio verde, um substituto sustentável para os combustíveis fósseis que pode ser aplicado como agente redutor na indústria siderúrgica. Nesse contexto, foi realizada uma pesquisa bibliográfica para discutir o tema. Para produzir hidrogênio verde, a água passa por tratamentos, como osmose reversa, ajuste químico, filtração, crivagem, coagulação e floculação para remover impurezas. Em seguida, a água tratada é submetida a tecnologias de eletrólise, como PEM, alcalina, célula de óxido sólido e membrana de troca aniônica. A eletrólise é um processo que converte água em hidrogênio e oxigênio, utilizando uma diferença de potencial. Dessa forma, o hidrogênio verde é obtido através da eletrólise da água, utilizando energias renováveis, como eólica, solar, hídrica e biomassa. Por fim, o hidrogênio produzido pode ser aplicado como agente redutor no processo de redução do minério de ferro para produção de aço, substituindo os combustíveis fósseis de forma sustentável e, conseqüentemente, contribuindo para a descarbonização do aço. Apesar do alto custo de produção, o hidrogênio verde é uma das melhores alternativas para descarbonizar a atmosfera, pois não emite CO₂ durante sua produção.

Palavras-chave:

Energias renováveis; descarbonização do aço.

ABSTRACT

The increase in carbon emissions and the search for sustainable solutions to mitigate environmental impacts have driven the development of clean technologies. This study aims to present the current water electrolysis technologies used for the production of green hydrogen, a sustainable substitute for fossil fuels that can be applied as a reducing agent in the steel industry. In this context, a literature review was conducted to discuss the topic. To produce green hydrogen, water undergoes treatment processes such as reverse osmosis, chemical adjustment, filtration, screening, coagulation, and flocculation to remove impurities. The treated water is then subjected to electrolysis technologies such as PEM, alkaline, solid oxide cell, and anion exchange membrane. Electrolysis is a process that converts water into hydrogen and oxygen using a potential difference. In this way, green hydrogen is obtained through water electrolysis powered by renewable energy sources such as wind, solar, hydro, and biomass. Finally, the hydrogen produced can be used as a reducing agent in the process of iron ore reduction for steel production, sustainably replacing fossil fuels and consequently contributing to the decarbonization of steel. Despite the high production cost, green hydrogen is one of the best alternatives for decarbonizing the atmosphere, as it does not emit CO₂ during its production.

Keywords:

Renewable energies; decarbonization of steel.

1 INTRODUÇÃO

A Organização das Nações Unidas (ONU) tem como um de seus principais objetivos a mitigação da emissão de poluentes no planeta Terra. Atualmente, a busca por soluções alternativas para combustíveis que apresentem alto rendimento, sustentabilidade e origem não poluente é uma prioridade (Kumar, 2022). A eletrólise da água, processo que teve seu início no ano de 1800 com a descoberta revolucionária dos cientistas britânicos William Nicholson e Anthony Carlisle, que utilizaram corrente elétrica para separar a água em hidrogênio e oxigênio, é uma dessas soluções. Essa descoberta pavimentou o caminho para o desenvolvimento da tecnologia de eletrólise. No início do século XX, em 1902, mais de 400 eletrolisadores alcalinos estavam em operação, produzindo hidrogênio e oxigênio de alta pureza para diversos fins (Machado, 2020).

Em 1939, a primeira planta de eletrólise em grande escala iniciou suas operações com capacidade de operação de hidrogênio de 10.000 N/m³. Em 1948, duas empresas da Eslovênia criaram os primeiros eletrolisadores pressurizados, com o intuito de aumentar a eficiência da eletrólise. Já em 1966, uma empresa dos Estados Unidos desenvolveu o primeiro sistema de membrana eletrolítica polimérica (PEM). Em 1972, foi construída a primeira planta de eletrólise de óxido sólido e, por fim, em 1978, os primeiros sistemas alcalinos avançados foram construídos (Knob, 2013). Assim, com o desenvolvimento de eletrolisadores cada vez mais tecnológicos e otimizados, a produção de hidrogênio, elemento que vem sendo fortemente cotado para ser o substituto dos combustíveis fósseis, torna-se cada vez mais eficiente.

O hidrogênio (H₂) é um elemento abundante na natureza e, com o aumento da necessidade de fontes de energia alternativas e a intenção de mitigar os impactos ambientais causados pelos combustíveis fósseis, vem ganhando grande espaço no mercado atual. Esse elemento pode ser encontrado e “produzido” de diversas formas, sendo necessário, para cada forma de sua obtenção, diferentes recursos e tecnologias (Lara, 2023).

O hidrogênio verde ou hidrogênio sustentável é produzido a partir da eletrólise da água com a utilização de energias renováveis, como a eólica, solar, hídrica e fontes provenientes da biomassa. Nesse contexto, países como Alemanha, que estão na corrida pelo hidrogênio, estão em busca de parcerias com países que consigam produzir o hidrogênio a partir de fontes limpas, como o Brasil. O Brasil é um país que apresenta 83% da sua matriz energética composta por fontes de energia limpas, sendo 63,8% apenas de hidrelétricas. A Arábia Saudita buscou realizar um acordo com o Chile, o Reino Unido e a União Europeia, países esses que sempre utilizaram fontes de energias poluentes, para fomentar uma competição saudável pelo hidrogênio verde e, conseqüentemente, contribuir para descarbonização da atmosfera (Barroso, 2021).

Por ser totalmente produzido a partir dessas energias, o hidrogênio verde vem sendo fortemente cotado como uma das melhores alternativas para substituir os combustíveis fósseis e contribuir para a mitigação da carbonização da atmosfera, por não emitir dióxido de carbono em seu processo de produção. A não emissão do carbono se dá pelo fato de o processo de eletrólise gerar como produtos hidrogênio e oxigênio. No entanto, mesmo sendo benéfico para o planeta, ele também apresenta algumas desvantagens, sendo elas: o alto custo de produção, por necessitar de grandes volumes de água para sua produção; uma grande infraestrutura e; a grande necessidade de energia sustentável (Barroso, 2021).

O presente trabalho se propõe a apresentar as atuais soluções com vistas à sustentabilidade, no que tange à eletrólise do hidrogênio verde, considerando sua relevância como agente redutor potencialmente não poluente no setor siderúrgico, focando, principalmente, na redução do aço.

2 METODOLOGIA

O presente estudo tem como objetivo principal abordar a redução da emissão de carbono através da utilização de hidrogênio verde, com foco específico no processo de eletrólise da água. Essa abordagem é fundamentada pela necessidade de desenvolver tecnologias mais limpas e sustentáveis que contribuam para a descarbonização dos processos industriais, com ênfase na indústria siderúrgica, onde o hidrogênio verde se apresenta como uma alternativa promissora para a redução do aço. Para garantir uma revisão bibliográfica abrangente e relevante, foram definidas as seguintes palavras-chave: hidrogênio verde, eletrólise da água, tratamentos da água e redução a hidrogênio do aço. A partir dessas palavras-chave, foi realizada uma pesquisa em bases de dados científicas, como *Google Scholar* e *Science Direct*, priorizando artigos publicados entre os anos de 2004 e 2024. Após a triagem inicial, 22 artigos foram selecionados por atenderem aos critérios de relevância e qualidade científica.

Os artigos foram selecionados com base em critérios de inclusão e exclusão definidos para a pesquisa. Como critério de inclusão, foram considerados artigos revisados por pares, pesquisas experimentais, estudos de caso e revisões sistemáticas relacionadas ao tema proposto. Foram excluídos artigos sem revisão por pares, publicações em idiomas diferentes do inglês e português e trabalhos que não abordassem diretamente o hidrogênio verde ou o processo de eletrólise.

Após a seleção, os artigos foram analisados qualitativamente, com foco nos seguintes aspectos: principais métodos de produção de hidrogênio verde, técnicas e inovações no processo de eletrólise da água, aplicações do hidrogênio verde na redução de carbono com destaque para o setor siderúrgico e desafios e perspectivas futuras para o uso de hidrogênio verde. Com base na análise realizada, os principais achados foram sintetizados em uma discussão crítica, destacando-se as melhores práticas, as lacunas de pesquisa identificadas e as principais contribuições dos estudos selecionados para o avanço do tema.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

No intuito de mostrar as diferentes formas de se obter o hidrogênio, é possível perceber que algumas geram produtos nocivos ao meio ambiente, como, por exemplo, a utilização de combustíveis fósseis que, além do hidrogênio, produzem dióxido de carbono, substância que contribui para o aquecimento global (Oliveira, 2023). Sendo assim, um sistema de cores foi criado pela Agência Internacional de Energia (*International Energy Agency, IEA*), a fim de classificar cada um desses meios de obtenção. Esse sistema é composto por 13 cores diferentes, sendo cada uma delas relacionada diretamente aos recursos e meios de obtenção do hidrogênio, como observado na Quadro 1 (Zainal, 2024).

Quadro 1 – Fontes de Hidrogênio

Tipo de Hidrogênio	Definição da tecnologia utilizada	Vantagens	Desvantagens
	São moléculas de hidrogênio que ocorrem simultaneamente, formadas através de fracking e encontradas em depósitos subterrâneos.	Ocorre naturalmente	-----
	Subproduto do processo industrial. Produzido a partir da eletrólise da água usando fontes de energias renováveis.	Aumento da reciclagem; promoção da bioenergia; não emite GEE (gases do efeito estufa); produzido de eletricidade limpa; não emissão de dióxido de carbono. Espera-se que tenha preço baixo e se torne comum. É a forma mais comum de produção de hidrogênio.	Alto custo de produção; perdas de energia; falta de estrutura dedicada: fonte de energia renovável, eletrolisador, tanques de armazenamento, sistema de purificação e compressão. Necessidade de garantir sustentabilidade. Falta de reconhecimento de valor.
	Produzido a partir do SMR (reforma do gás metano) de combustíveis fósseis (sem ser o carvão).	Forma mais comum de produção de hidrogênio.	Emissão de dióxido de carbono; emissão de outros GEE; uso contínuo de alguns combustíveis fósseis.
	O hidrogênio do gás natural é produzido através do processo SMR para capturar e enterrar GEE.	Pode capturar e remover gases de efeito estufa usando tecnologia de captura e armazenamento de carbono (CCS). Também é conhecido como hidrogênio de baixo carbono.	Produz dióxido de carbono como subproduto.
	Metanação a vapor de gás natural renovável com CCS.	Pode capturar e armazenar carbono.	O processo produz uma grande quantidade de dióxido de carbono.
	Derivado da pirólise do metano (divisão térmica).	Produz hidrogênio e carbono sólido. No futuro, pode ser valorizado como hidrogênio de baixa emissão, dependendo de vários fatores.	Gera um pequeno número de GEE.
 	Produzido pela gaseificação do carvão.	Produz hidrogênio liquefeito para uso de baixa emissão.	Esse processo produz grande quantidade de dióxido de carbono, monóxido de carbono, e outros GEE (oposto do hidrogênio verde).
	Produzido a partir de usinas nucleares. Esse processo de eletrólise quimiotérmica usa energia nuclear e calor para dividir a água.	Baixa emissão de carbono.	Usa temperaturas muito altas de reatores nucleares. Gera um número baixo de GEE.
	Produzido a partir da eletrólise da água alimentada por energia nuclear.	O vapor gerado pelos reatores nucleares pode ser usado para outras produções de hidrogênio para uma eletrólise mais eficiente.	Usa temperaturas muito altas de reatores nucleares. Gera uma baixa quantidade de GEE.
	Produzido a partir de uma rede energética através da eletrólise da água.	Produzido a partir da eletrólise usando energia solar.	As emissões de carbono variam muito dependendo das fontes usadas para alimentar a rede.
	A energia térmica gerada pela energia nuclear é usada para alimentar a divisão catalítica da água em alta temperatura. Usinas nucleares modulares menores estão sendo implementadas para aumentar a tecnologia eólica, solar e de baterias no setor de energia.	Não emissão de dióxido de carbono.	Usa temperaturas muito altas. Gera uma pequena quantidade de GEE.
	Produzido a partir de resíduos plásticos através de gaseificação ou pirólise com CCS.	Baixos custos de matéria-prima. Requer menos energia.	Encontra-se em um estado inicial, entretanto mais pesquisas sobre o assunto são necessárias.

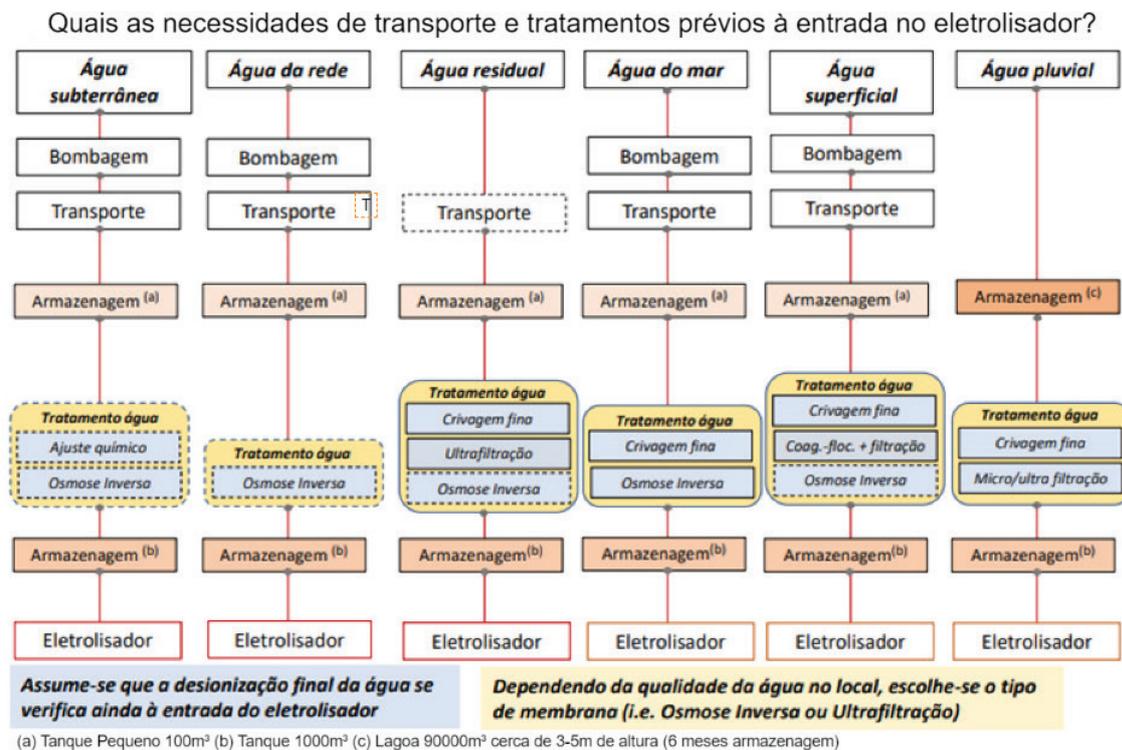
Fonte: Zainal, 2024

Conforme observado no Quadro 1, é possível verificar as fontes de obtenção de hidrogênio mais poluentes e as menos poluentes. Nesse sentido, as fontes de obtenção de hidrogênio mais poluentes são as relacionadas às cores preto e marrom, em que se obtém o hidrogênio por meio da gaseificação do carvão, que acaba tendo a desvantagem de produzir dióxido e monóxido de carbono, fora a produção de outros GEEs (gases do efeito estufa). Ademais, um meio de obtenção intermediário seria a associada ao ciano, no qual o hidrogênio é obtido através da pirólise do metano, tendo a vantagem de produzir hidrogênio e carbono sólido, e com a pequena desvantagem de produzir uma pequena quantidade de GEEs. E, por fim, também é possível encontrar o chamado hidrogênio verde, a tecnologia já citada anteriormente, que vem sendo discutida e estudada nos últimos anos (Zainal, 2024).

Nesse contexto, em termos de valores necessários para produzir o hidrogênio verde, são necessários de 9 a 22,4 litros de água para cada quilograma de hidrogênio durante o processo de eletrólise e, em termos médios, as necessidades diárias são de 5,70m³ de água por MWh de hidrogênio, para um eletrolisador alcalino, e de 6,33m³ por MWh de hidrogênio, para um PEM. No que tange à tecnologia de eletrólise, se verifica a aplicação de dois tipos de eletrolisadores: o alcalino e o de membrana com troca de prótons (Simões, 2021).

Para que a eletrólise ocorra corretamente, é necessário que a água seja desmineralizada, para que as impurezas não afetem o processo (Simões, 2021). Para cada fonte de água, serão necessários diferentes tratamentos prévios, como previsto na Figura 1, na qual é possível observar que existem 6 principais formas de tratamento da água: Osmose Inversa, Ajuste Químico, Filtração (micro e ultra), Crivagem Fina, Coagulação e Floculação.

Figura 1 - Tratamento da água



Nesse sentido, cada uma dessas formas de tratamentos de água se dá pelos seguintes conceitos:

Osmose Inversa: também conhecida como *Osmose Reversa*, é um processo de tratamento em que a água é forçada a passar de uma área de maior concentração para uma área de menor concentração, por intermédio

da aplicação de uma pressão superior à pressão osmótica da solução em questão. Nesse sentido, a água passa de um meio para o outro por meio de membranas que operam em pressões entre 7000 kPa e 15000 kPa. A osmose inversa é o processo de tratamento que utiliza as membranas com os menores poros, permitindo a eliminação de impurezas mais eficiente entre todos os tipos tratamentos de água (Guimarães, 2017).

Ajuste Químico: esse tratamento se dá pelo ajuste das propriedades químicas da água, pela junção de vários outros tratamentos. Nesse sentido, a água primeiro passa por outros tratamentos, como Coagulação e Floculação, seguido pelo ajuste do PH da água para um valor próximo a 7 através da adição de bases ou sais básicos. E, por fim, a água é finalmente desinfetada, por meio da utilização de cloro, eliminando o restante dos microrganismos causadores de doenças (Ramos, 2019).

Filtração: é o processo final de remoção das impurezas da água através de membranas porosas que podem variar de tamanho, conforme as impurezas que se quer eliminar (Francisco, 2011). Nesse sentido, a microfiltração seria a filtração mais próxima da clássica, utilizando suas membranas porosas com poros entre 0,1 a 10 μm . Já a ultrafiltração, visa separar, com base no peso e no tamanho molecular, as substâncias, podendo barrar agentes infecciosos, como o vírus, por meio de suas membranas com poros entre 0,1 e 0,01 μm (Guimarães, 2017).

Crivagem Fina: trata-se de um processo de eliminação das partículas sólidas e impurezas pequenas que se encontram na água através de peneiras, telas com aberturas finas ou até mesmo através de um tamisador, equipamento utilizado para separação de sólidos (Pereira, 2010).

Coagulação: consiste na eliminação de impurezas da água com a adição de produtos químicos, principalmente, coagulantes hidrolisados. Nesse tratamento, ocorre a maior parte da eliminação das impurezas suspensas na água (Francisco, 2011).

Floculação: é um processo em que as impurezas da água entram em contato com agentes coagulantes, como o sulfato de alumínio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) ou o cloreto férrico (FeCl_3), por exemplo, formando partículas maiores denominadas flocos, que são encaminhadas para decantadores ou floculadores para sejam eliminadas (Francisco, 2011).

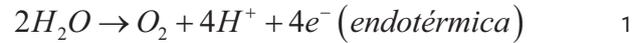
Um outro tipo de hidrogênio que vem sendo estudado e que não aparece no sistema de cores (Quadro 1) é o chamado hidrogênio superverde. Esse tipo de hidrogênio é praticamente igual ao hidrogênio verde na sua forma de obtenção. Entretanto, ele é produzido exclusivamente a partir da eletrólise feita através de luz solar e da água, que são recursos que se encontram em maior abundância (Rumayor, 2023). Além disso, em seu processo de eletrólise, a água é misturada com um solvente eutético, formado a partir de um composto receptor de ligação de hidrogênio, como amidas, aminas, álcoois e ácidos carboxílicos, com um composto doador de ligação de hidrogênio. Esse solvente, além de ter uma temperatura de fusão mais baixa que os demais, é biodegradável e sustentável, contribuindo ainda mais para a desfossilização dos combustíveis e para a descarbonização do planeta (Santana, 2021).

A produção de hidrogênio verde requer uma fonte de energia renovável para alimentar um eletrolisador de água com corrente elétrica. Embora as fontes de energia renováveis, como a nuclear e a hidroelétrica, estejam bem estabelecidas em todo o território nacional, as fontes emergentes no mercado, como a solar e a eólica, são vistas como as opções mais promissoras para minimizar os impactos na saúde humana e no meio ambiente (Gambetta, 2010).

Durante a eletrólise, como pode ser visto na Figura 2, uma reação endotérmica, no caso da água, a energia elétrica é convertida em energia química na forma de hidrogênio (H_2), com oxigênio (O_2), sendo pro-

duzido como subproduto. Duas reações distintas ocorrem em cada eletrodo (anodo e catodo), conforme as equações 1 e 2 (Zainal, 2024).

Anodo (oxidação):

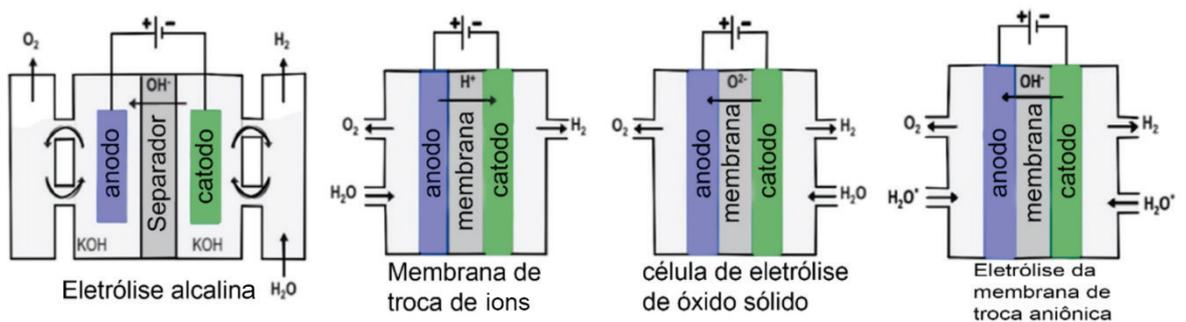


Catodo (redução):



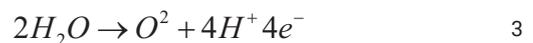
Atualmente, estão disponíveis quatro tecnologias para a eletrólise da água, conforme visto na Figura 2: alcalina (*alkaline*), membrana de troca de íons (PEM - *Proton Exchange Membrane*), célula de eletrólise de óxido sólido (SOEC - *Solid Oxide Electrolysis Cell*) e eletrólise da membrana de troca aniônica (AEM - *Anion Exchange Membrane*).

Figura 2 - Configuração de quatro tecnologias de células de eletrólise

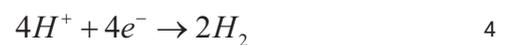


Fonte: Zainal, 2024

Nessa tecnologia, a água é introduzida no compartimento anódico, com um eletrodo de platina, onde é oxidada, processo que libera elétrons, íons e oxigênio. Simultaneamente, no catodo que, geralmente, utiliza um eletrodo de grafite, os íons são reduzidos, produzindo hidrogênio gasoso. No anodo, a reação se dá pela Equação 3 (Gambetta,2010):

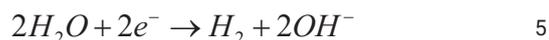


Os íons migram através da membrana polimérica condutora em direção ao catodo, seguindo a seguinte reação da Equação 4:

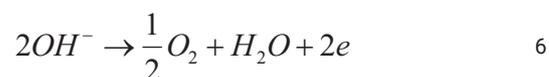


A AEM, equipada com uma membrana condutora, garante a separação eficaz dos gases hidrogênio e oxigênio. Essa permeabilidade seletiva garante que o hidrogênio e o oxigênio permaneçam separados dentro da célula de combustível, evitando, assim, sua mistura prematura e permitindo que o hidrogênio seja coletado no catodo (Martins, 2022).

O princípio da eletrólise alcalina da água é ilustrado de forma esquemática na Figura 2, utilizando o exemplo de um eletrolisador de arranjo monopolar. No catodo, em geral de grafite, duas moléculas de água são reduzidas a uma molécula de hidrogênio e dois íons hidroxila, conforme a Equação 5 (Zoulias, 2004):



O hidrogênio, então, se desprende da superfície do catodo e se recombina na forma gasosa. Simultaneamente, os íons hidroxila migram do catodo para o anodo, que, normalmente, é utilizado platina, sob a influência do campo elétrico, atravessando o diafragma poroso. Ao chegarem ao anodo, são descarregados e formam 1/2 molécula de oxigênio e uma molécula de água, podendo ser representada pela Equação 6:



O SOEC é um dispositivo composto por um eletrodo de hidrogênio, também chamado de eletrodo de vapor, que promove a redução eletroquímica do vapor de água na região próxima onde o eletrólito e o eletrodo se encontram. Nesse processo, o vapor d'água é convertido em hidrogênio gasoso, conforme previsto na Equação 7 (Nechache, 2021):



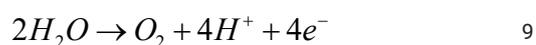
A camada de eletrólito é de suma importância, pois define a composição das demais camadas adjacentes, como os eletrodos, a camada de suporte, a membrana, o isolamento e a fixação. O eletrólito deve ser altamente condutor de íons de oxigênio (O^{2-}) para assegurar um desempenho eficiente. Um material de ponta para o eletrólito é a zircônia estabilizada com ítria (YSZ - *Yttria-Stabilized Zirconia*), especialmente a YSZ dopada com 8 mol de ítria. A YSZ é uma cerâmica densa baseada em óxido de zircônio com uma estrutura cristalina cúbica estabilizada pela adição de ítria. A YSZ se destaca devido à sua alta condutividade iônica, estabilidade térmica e química, permitindo uma eletrólise eficiente na faixa de temperatura típica de 700-850°C.

O eletrodo de oxigênio, também conhecido como eletrodo de ar, é responsável pela oxidação dos íons O^{2-} para formar o gás O_2 , conforme a Equação 8:



A camada intermediária, normalmente composta por céria dopada com gadolínio (GDC - *Gadolinium-Doped Ceria*) ou céria dopada com ítrio (YDC - *Yttrium-Doped Ceria*), é crucial para prevenir problemas de degradação do eletrodo de oxigênio. Essa camada é fundamental em células de combustível de membrana, pois ajuda a controlar a reação química e a transferência de elétrons entre as camadas e eletrodo e a membrana (Nechache, 2021).

O processo de eletrólise utilizando uma Membrana de Troca Aniônica (*Anion Exchange Membrane*) é uma técnica inovadora para a produção de hidrogênio a partir da eletrólise da água. Esse método tem como objetivo substituir os eletrocatalisadores de platina que são mais tradicionais, feitos de metais nobres, por metais de transição mais acessíveis, melhorando, assim, a relação custo-benefício. A AEM desempenha um papel crucial nesse processo, pois separa os compartimentos do anodo e do catodo, permitindo o transporte seletivo de ânions e bloqueando os cátions para manter o equilíbrio de carga durante a eletrólise. A água é fornecida ao compartimento do anodo, que é constituído de óxido de irídio (IrO_2), onde é oxidada para produzir gás oxigênio e cations (íons H^+), como visto na Equação 9.



Esses cátions, então, migram através da AEM para o compartimento do catodo, também constituído de óxido de irídio (IrO_2) onde são reduzidos para formar gás hidrogênio, conforme a Equação 10:



A eficiência e o desempenho da eletrólise utilizando AEM são influenciados por vários fatores, incluindo a estabilidade da membrana, a atividade do eletrocatalisador e as propriedades do ionômero, um tipo de polímero em que uma pequena, mas significativa proporção tem grupos iônicos ou ionizáveis. Esses elementos afetam tanto a cinética das reações eletroquímicas quanto os processos de transporte de massa (Vincent, 2018).

O processo de redução do minério de ferro com hidrogênio verde consiste em utilizar esse gás como agente redutor no lugar do carbono, promovendo uma rota mais limpa e sustentável para a produção de aço. No forno de eixo de redução, o hidrogênio previamente aquecido reage com os óxidos de ferro em altas temperaturas (acima de 570 °C), removendo o oxigênio e transformando o minério em ferro metálico, com geração de vapor de água como subproduto. Por ser uma reação endotérmica, o processo exige fornecimento externo de energia, o que permite maior controle e segurança operacional. O hidrogênio utilizado é obtido via eletrólise da água com fontes renováveis, sendo reciclável durante o processo, o que aumenta sua eficiência. Além disso, tecnologias experimentais, como a redução por plasma de hidrogênio, estão sendo desenvolvidas para otimizar ainda mais essa rota, que se mostra fundamental na descarbonização da indústria siderúrgica e na transição para o chamado aço verde (Silva, 2024).

A utilização do hidrogênio verde como agente redutor na produção de aço surge como uma solução inovadora e promissora para a descarbonização da indústria siderúrgica, especialmente no contexto da construção civil. Segundo Lima *et al.* (2024), a substituição do carvão metalúrgico pelo hidrogênio verde permite uma produção de aço praticamente livre de emissões de dióxido de carbono, emitindo apenas vapor de água como subproduto. Com isso, essa transformação tecnológica é fundamental para reduzir as emissões de um setor que, atualmente, responde por cerca de 8% das emissões globais de CO₂. Ademais, o uso de hidrogênio produzido por eletrólise com energia renovável contribui para alinhar a indústria do aço às metas internacionais de neutralidade de carbono, promovendo um modelo industrial mais sustentável e ambientalmente responsável (Lima *et al.*, 2024).

A substituição do coque pelo hidrogênio na produção do aço tem sido amplamente estudada como uma estratégia eficaz para mitigar as emissões de gases de efeito estufa no setor siderúrgico. De acordo com Azevedo *et al.* (2024), a aplicação do hidrogênio como agente redutor no processo de redução do minério de ferro possibilita a eliminação do CO₂ como subproduto, sendo este substituído por vapor d'água, o que representa um avanço significativo rumo à descarbonização da indústria. Os autores destacam que, apesar de desafios técnicos e econômicos, como o maior custo em relação ao processo convencional, a utilização do hidrogênio verde pode contribuir diretamente para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU, promovendo um setor siderúrgico mais limpo e eficiente. Além disso, estudos de modelagem indicam que é possível reduzir em até 21,4% as emissões de CO₂ com a aplicação dessa tecnologia, reforçando sua viabilidade ambiental (Azevedo *et al.*, 2024).

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A produção de hidrogênio verde por eletrólise da água representa uma das soluções mais promissoras para a transição energética e a descarbonização da indústria siderúrgica. Seu potencial como agente redutor limpo, aliado à abundância de recursos renováveis em países, como o Brasil, fortalece sua viabilidade técnica e ambiental. No entanto, o avanço dessa tecnologia depende da superação de desafios importantes, como a redução de custos, o desenvolvimento de infraestrutura adequada e a melhoria da eficiência dos processos de eletrólise e tratamento de água. Investimentos em pesquisa e inovação, além de políticas públicas de incentivo e regulamentações claras, são essenciais para acelerar sua implementação em larga escala. Ao integrar ciência, sustentabilidade e planejamento estratégico, o hidrogênio verde pode consolidar-se como pilar central de uma siderurgia mais limpa e resiliente, sendo uma ótima alternativa para reduzir o aço na sociedade moderna.

REFERÊNCIAS

- Azevedo, M. V. de; Pessoa, F. L. P.; Almeida, J. L. G. De. **Análise do processo de produção do aço a partir da aplicação de hidrogênio**. IX SAPCT – SENAI CIMATEC, 2024. Anuário de Resumos Expandidos. Disponível em: <https://doity.com.br/anais/sapct2024/trabalho/353492>. Acesso em: 10 maio 2025.
- Barroso, A. M. R.; Rocha, B. V. S.; Alves, L. F. L.; Filho, M. R. G. M.; **Obtenção do Hidrogênio verde a partir de energias renováveis**. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica – PPGEE. Universidade Federal do Piauí – UFPI, 2021. Disponível em: <https://cet.edu.br/files/pages/95/artigo.pdf>. Acesso em: 19 mar. 2024.
- Francisco, A. A.; Pohlmann, P. H. M.; Ferreira, M. A.; **Tratamento Convencional de Águas para Abastecimento Humano: Uma Abordagem Teórica dos Processos Envolvidos e dos Indicadores de Referência**. II Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental. Londrina, PR, 6 a 9 de nov. de 2011. Disponível em: <https://www.ibeas.org.br/congresso/Trabalhos2011/IX-005.pdf>. Acesso em: 18 abr. 2024.
- Gambetta, F. **Análise Técnica e Econômica de Retificadores de Corrente para Produção de Hidrogênio Eletrolítico: Estudo de Caso Aproveitando a EVT da UHE de Itaipu**. 2010. 163 f. Dissertação (Mestrado em Planejamento de Sistemas Energéticos) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2010. Disponível em: https://www.repositorio.unicamp.br/API_repositorio_digital/arquivo?p=S3YX-QoJsBLymqf11MzZWTHYrDTmtF17gWdg8zVuCMRe2HBmXCBZCeY32rd4N43%2FHoVCrrV8SJ%2BteQwuWRumFRVzhK%2F0tqcOXwAGzAunoiwFP10%2B3iWJQACcRWljz19M0t52q30IbACVsaChs9cT7c2GAaV33nJawJ2%2BvISL7VhjzFHL2RNolKb59yTkrP9%2BpMGmSJzmmzSq1XDjJ27rBJvCQCIIIGJxAzqB%2Fo6ammmVhhpEQpZOjsTbPqtO8xGR3UtrB4gTIKD%2FX6%2F3TvO6U7A%3D%3D. Acesso em: 15 mar. 2024
- Guimarães Filho, M. B.; **Análise da Implementação do Sistema de Membranas Ultrafiltrantes em uma Eta de Ciclo Completo a partir do estudo de caso da Eta Meia Ponte**. Universidade Federal de Goiás. Goiânia, dezembro de 2017. Disponível em: https://files.cercomp.ufg.br/weby/up/140/o/AN%C3%81LISE_DA_IMPLIMENTA%C3%87%C3%83O_DO_SISTEMA_DE_MEMBRANAS_ULTRAFILTRANTES_EM_UMA_ETA_DE_CICLO_COMPLETO_A_PARTIR_DO_ESTUDO_DE_CASO_DA_ETA_MEIA_PONTE.pdf. Acesso em: 18 de abr. de 2024.
- Knob, D. **Geração de hidrogênio por eletrólise da água utilizando energia solar fotovoltaica**. 2013. 125 f. Dissertação (Mestrado em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear - Materiais) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Autarquia associada à Universidade de São Paulo, São Paulo. 2013. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/75/75134/tde-05102022-151128/publico/WilliamSantacruzParrarevisada.pdf>. Acesso em: 2 abr. 2024.
- Kumar, S. S.; Lim, H.; **An overview of water electrolysis technologies for green hydrogen production**. Energy Reports, Volume 8,2022, Pages 13793-13813. ISSN 2352-4847, Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.10.127>. Acesso em: 2 abr. 2024.
- Lara, D.; Richter, M.; **Hidrogênio Verde: A Fonte de Energia do Futuro**. Universidade Estadual do Rio Grande do Sul (UERGS). **Novos Cadernos NAEA**, v. 26, n. 1, jan-abr. 2023. Disponível em: <https://periodicos.ufpa.br/index.php/ncn/article/viewFile/12746/10175>. Acesso em: 19 mar. 2024.
- Lima, J. R. DE O. *et al.* **Descarbonização do setor da construção civil através do uso do hidrogênio verde na produção do aço**. Revista SODEBRAS, v. 19, n. 222, p. 1–8, set./dez. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.29367/g5y9sh46>. Acesso em: 15 abr. 2024.

Machado, S. A. S.; **Eletrólise da Água**. Universidade de São Paulo. Instituto de Química de São Carlos. São Carlos, 2020. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/75/75134/tde-05102022-151128/publico/WilliamSantacruzParrarevisada.pdf> Acesso em: 17 abr. 2024.

Martins, G. A. C.; Canas. **Análise de um sistema de energia usando uma célula bivalente de membrana eletrolítica alcalina a hidrogênio. Desenho de uma célula. Estado atual desta tecnologia e seu desenvolvimento futuro**. Mestrado Integrado em Engenharia da Energia e do Ambiente. 2022. Tese de Doutorado. Disponível em: repositorio.ulisboa.pt/bitstream/10451/58975/1/TM_Guilherme_Martins.pdf Acesso em: 10 abr. 2024.

Nechache, A.; Hody, S.; **Alternative and innovative solid oxide electrolysis cell materials: A short review**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 149, p. 111322, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032121006080> Acesso em: 13 abr. 2024.

Oliveira, B. L. de C.; **Transição energética no Brasil: comparação da infraestrutura do hidrogênio com outras fontes**. Unidade Acadêmica De Controle E Processos Industriais - Coordenação De Engenharia Elétrica. João Pessoa, 2023. Disponível em: <https://repositorio.ifpb.edu.br/handle/177683/3454>. Acesso em: 19 mar. 2024.

Pereira, D. S. da S.; **Avaliação da eco-eficiência de quatro estações de tratamento de águas residuais da Águas do Minho e Lima, SA**. Mestrado integrado em Engenharia do Ambiente. Porto, 14 de outubro de 2010. Disponível em: <https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/58935/1/000143777.pdf>. Acesso em: 20 abr. 2024.

Ramos, A. de S.; Oliveira, V. de P. S.; Araújo, T. M. de R.; **QUALIDADE DA ÁGUA: PARÂMETROS E MÉTODOS MAIS UTILIZADOS PARA ANÁLISE DE ÁGUA DE RECURSOS HÍDRICOS SUPERFICIAIS**. Instituto Federal Fluminense (IFF), Campos dos Goytacazes, RJ. Junho de 2019. Disponível em: <https://www.cea-unesp.org.br/holos/article/view/12315>. Acesso em: 8 maio 2024.

Rumayor, M.; Fernández-Gonzalez, J.; Domínguez-Ramos, A.; Irabien, A.; **Perspectives for a sustainable implementation of super-green hydrogen production by photoelectrochemical technology in hard-to-abate sectors**; Cleaner Production Letters, Volume 4, 2023; 100041. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.clpl.2023.100041>. Acesso em: 19 mar. 2024.

Santana, A. P. R.; Andrade, D. F.; Guimarães, T. G. S.; Amaral, C. D. B.; Oliveira, A.; Nogueira, A. R. A.; Gonzalez M. H.; **Natural deep eutectic solvents (NADES) in sample preparation of phosphate rock and mineral supplement for elementary determination by plasma-based techniques**. Quim. Nova, Vol. 44, No. 6, 689-695, 2021. <https://doi.org/10.21577/0100-4042.20170723>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/qn/a/8mB5NZN3TRHwXGXM-nW4q8BP/?lang=pt&format=pdf>. Acesso em: 18 abr. 2024.

Silva, F. L. F. da; Silva, H. E. S. da; Pereira, B. S.; Ribeiro, S. B.; Rodrigues, W. H. Do V.; **Processo e termodinâmica da redução a hidrogênio do minério de ferro**. Cadernos UniFOA, Volta Redonda, v. 19, n. 54, p. 1–12, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.47385/cadunifoa.v19.n54.5249>. Acesso em: 10 maio 2025.

Simões, Sofia G.; Amorim, F.; Catarino, J.; Rangel, C. M.; Lopes, T.; Gírio, F.; Picado, Ana; Leão T. P.; **Água Para A Produção De Hidrogênio Verde (Renovável) Via Eletrólise Em Portugal**. Junho ,2021. Disponível em: <https://repositorio.Ineg.pt/handle/10400.9/3585>. Acesso em: 19 mar. 2024.

Vincent, I.; Bessarabov, D.; **Low-cost hydrogen production by anion exchange membrane electrolysis: A review**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 81, p. 1690-1704, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.258>. Acesso em: 15 jul. 2024.

Zainal, B. S.; Ker, P. J.; Mohamed, H.; Ong, H. C.; Fattah, I. M. R.; Rahman, S. M. A.; Nghiem, L. D.; Mahila, T. M. I.; **Recent advancement and assessment of green hydrogen production Technologies**; Renewable and Sustainable Energy Reviews; Volume 189, Part A, 2024; 113941; ISSN 1364-0321; <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113941>. Disponível em: (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032123007992>). Acesso em: 19 mar. 2024.

Zoulias, E. et al. **A review on water electrolysis**. Tcjst, v. 4, n. 2, p. 41-71, 2004. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/284618929_A_Review_on_Water_Electrolysis Acesso em: 15 abr. 2024.