

QUALIDADE DA ÁGUA E REUSO DE EFLUENTES NA PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO VERDE: CONTRIBUIÇÕES PARA A TRANSIÇÃO ENERGÉTICA

WATER QUALITY AND WASTEWATER REUSE IN GREEN HYDROGEN PRODUCTION: CONTRIBUTIONS TO THE ENERGY TRANSITION

CALIDAD DEL AGUA Y REUTILIZACIÓN DE EFLUENTES EN LA PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO VERDE: CONTRIBUCIONES A LA TRANSICIÓN ENERGÉTICA



10.56238/revgeov16n5-238

Virna Gomes Coreia Pinto

Graduanda em Engenharia de Produção Mecânica
Instituição: Universidade Regional do Cariri (URCA)
E-mail: virna.gomes@urca.br

Rodolfo José Sabiá

Doutorado em Engenharia Civil
Instituição: Universidade Federal do Ceará (UFC)
E-mail: rodolfo.sabia@urca.br

Yonar Cavalcante da Silva

Graduada em Construção Civil
Instituição: Universidade Regional do Cariri (URCA)
E-mail: yonar.cavalcante@urca.br

Everson de Araújo Maia

Graduando em Engenharia de Produção Mecânica
Instituição: Universidade Regional do Cariri (URCA)
E-mail: jaimefrancelino1@gmail.com

Jaime Francelino de Oliveira Neto

Graduando em Engenharia de Produção Mecânica
Instituição: Universidade Regional do Cariri (URCA)
E-mail: everson.maia@urca.br

Maria Elenice Feitosa de Almeida

Mestranda em Meio Ambiente
Instituição: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE)
E-mail: Elenice.almeida@urca.br

David Johnnysen Vieira de Oliveira

Graduando em Engenharia de Produção Mecânica
Instituição: Universidade Regional do Cariri (URCA)
E-mail: david.johnnysen@urca.br



Valério Antônio Pamplona Salomon

Doutorado em Engenharia Civil

Instituição: Universidade Estadual Paulista (UNESP)

E-mail: valerio.salomon@unesp.br

RESUMO

A crescente dependência da sociedade de tecnologias intensifica o consumo de energia, ainda majoritariamente proveniente de fontes fósseis, responsáveis por elevadas emissões de dióxido de carbono e agravamento do aquecimento global. Diante desse problema, torna-se essencial avançar na descarbonização e na transição energética, destacando-se o hidrogênio verde como alternativa promissora. O estudo tem como objetivo analisar a importância da descarbonização, o papel da transição energética e os desafios envolvidos na produção de hidrogênio verde pela eletrólise da água, com ênfase nos parâmetros de qualidade hídrica e no potencial de reuso de águas residuais tratadas. Para tanto, procede-se à realização de uma revisão da literatura, contemplando artigos científicos, relatórios técnicos e documentos internacionais, como a Agenda 2030 da ONU, especialmente os ODS 6 e 7. Desse modo, observa-se que a pureza da água é determinante para a eficiência da eletrólise, sendo necessário controlar condutividade, carbono orgânico total, íons corrosivos, pH e temperatura. Verifica-se, ainda, que o reuso de águas residuais tratadas surge como alternativa sustentável, reduzindo a demanda por água potável. Conclui-se que o hidrogênio verde representa um avanço estratégico para a descarbonização e contribui significativamente para uma matriz energética mais limpa e equilibrada.

Palavras-chave: Transição Energética. Hidrogênio Verde. Eletrólise. Qualidade da Água.

ABSTRACT

The growing dependence of society on technology intensifies energy consumption, which is still predominantly derived from fossil fuels, responsible for high carbon dioxide emissions and the worsening of global warming. Given this problem, it becomes essential to advance in decarbonization and the energy transition, with green hydrogen standing out as a promising alternative. This study aims to analyze the importance of decarbonization, the role of the energy transition, and the challenges involved in the production of green hydrogen through water electrolysis, with an emphasis on water quality parameters and the potential for reuse of treated wastewater. To this end, a literature review is carried out, including scientific articles, technical reports, and international documents, such as the UN 2030 Agenda, especially SDG 6 and 7. It is thus observed that water purity is crucial for the efficiency of electrolysis, making it necessary to control conductivity, total organic carbon, corrosive ions, pH, and temperature. It has also been verified that the reuse of treated wastewater emerges as a sustainable alternative, thereby reducing the demand for potable water. It is concluded that green hydrogen represents a strategic advance for decarbonization and contributes significantly to a cleaner and more balanced energy matrix.

Keywords: Energy Transition. Green Hydrogen. Electrolysis. Water Quality.

RESUMEN

La creciente dependencia de la sociedad de las tecnologías intensifica el consumo de energía, la cual sigue proviniendo mayoritariamente de fuentes fósiles, responsables de elevadas emisiones de dióxido de carbono y del agravamiento del calentamiento global. Ante este problema, se vuelve esencial



avanzar en la descarbonización y la transición energética, destacándose el hidrógeno verde como una alternativa prometedora. El objetivo de este estudio es analizar la importancia de la descarbonización, el papel de la transición energética y los desafíos que implica la producción de hidrógeno verde mediante la electrólisis del agua, con énfasis en los parámetros de calidad hídrica y el potencial de reúso de aguas residuales tratadas. Para ello, se procede a realizar una revisión de la literatura, que incluye artículos científicos, informes técnicos y documentos internacionales, como la Agenda 2030 de la ONU, especialmente los ODS 6 y 7. De este modo, se observa que la pureza del agua es determinante para la eficiencia de la electrólisis, siendo necesario controlar la conductividad, el carbono orgánico total, los iones corrosivos, el pH y la temperatura. Se verifica, además, que el reúso de aguas residuales tratadas surge como una alternativa sostenible, reduciendo la demanda de agua potable. Se concluye que el hidrógeno verde representa un avance estratégico para la descarbonización y contribuye significativamente a una matriz energética más limpia y equilibrada.

Palabras clave: Transición Energética. Hidrógeno Verde. Electrólisis. Calidad del Agua.



1 INTRODUÇÃO

É fato que do início do século até o presente momento (2025), a tecnologia tem avançado de forma exponencial; a velocidade do desenvolvimento observada no espaço de pouco mais de vinte anos é infinitamente maior que em qualquer outro século. Da comunicação às atividades acadêmicas e, até mesmo, tarefas domésticas, observa-se que a grande maioria da população mundial já está completamente adaptada ao estilo de vida vinculado aos aparatos proporcionados pelo cenário tecnológico atual. Uma população tão integralmente habituada tornou-se quase completamente dependente da tecnologia; essa dependência leva a uma demanda cada vez maior de recursos disponibilizados, tais como a energia necessária para garantir seu funcionamento e manutenção. A energia elétrica é, majoritariamente, um recurso fundamental para a população em sua maioria. Visto a necessidade do fornecimento em tempo integral, em larga escala, de energia para todo o mundo, já há muito tempo existe uma preocupação em relação à produção desse insumo e, visto o drama ambiental crescente, como tornar essa produção amigável ao meio ambiente e, ainda assim, manter o fornecimento ininterrupto a todas as regiões. Nesse contexto, a fim de prevenir a escassez dos recursos naturais, a transição energética, processo de mudança gradual das fontes poluentes de energia para fontes renováveis e limpas, se mostra como a única resposta ao problema.

A energia do hidrogênio é, de longe, a alternativa mais viável, sendo produzida a partir do hidrogênio em uma célula de combustível, dispositivo eletroquímico que transforma a energia molecular do hidrogênio em eletricidade, produzindo apenas água como subproduto, ou seja, não há dispersão de moléculas de carbono. O hidrogênio é o elemento mais abundante no universo e um dos elementos mais abundantes na crosta terrestre, mais uma razão para sua utilização como fonte de energia, no entanto, esse elemento não é encontrado em sua forma pura na natureza, geralmente está mixado a outros elementos, formando subprodutos como água (H_2O) e amônia (NH_3). Em razão disso, é necessário isolá-lo destes elementos a fim de armazená-lo em sua forma pura (H_2). Existem diversos métodos para sua produção, em virtude dos diferentes níveis de emissões de carbono em cada processo, o hidrogênio produzido em cada processo é classificado por cores (azul, rosa, verde, etc.).

O hidrogênio verde, por ser produzido a partir da eletrólise da água, método mais limpo de produção, separa as moléculas de hidrogênio e oxigênio presentes na água através da aplicação de uma carga elétrica, fornecida por fontes de energia limpa (solar ou eólica), gerando nenhuma emissão de carbono no processo. Uma das dificuldades do processo se encontra no fornecimento de água para eletrólise, dada a crise hídrica em diversas regiões em todo o mundo e o fato de que a água precisa estar em determinadas condições para ser utilizada na eletrólise, ou seja, além do fornecimento contínuo do recurso ainda há a necessidade de purificação para que a água apresente a qualidade necessária para o processo. Nesse contexto, a estratégia a ser formulada deve abranger os pontos cruciais: proveniência da água utilizada (de preferência mais de uma fonte), infraestrutura necessária



para garantir o abastecimento contínuo da produção, processo de filtração referente ao tipo de água utilizada e descarte dos resíduos após a limpeza. A utilização de água de diferentes fontes, algumas não convencionais, como água do mar e água de reuso municipal e industrial, esta segunda é uma resposta satisfatória à possível escassez do recurso, visto se tratar da água já utilizada, além de se mostrar uma solução aos problemas relacionados ao seu escoamento, prevenindo a poluição de rios e lagos, até então destinos comuns para essa água, além de filtrar os resíduos e direcioná-los a um local correto. O artigo tem como objetivo esclarecer os parâmetros de qualidade da água necessários para a produção de hidrogênio verde, demonstrar estratégias para desenvolver tratamentos para alcançar esses parâmetros e garantir o abastecimento das usinas de hidrogênio verde e reforçar a importância da transição energética para a descarbonização do planeta.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

A crise energética e climática global exige uma reavaliação urgente do modelo de consumo, majoritariamente baseado em fontes poluentes. Este referencial teórico apresenta os conceitos centrais que interligam a necessidade de descarbonização, a viabilidade do hidrogênio verde e os desafios cruciais de gestão de recursos hídricos para sua produção sustentável.

2.1 CRISE ENERGÉTICA E A TRANSIÇÃO NECESSÁRIA

A crescente dependência tecnológica intensificou o consumo de energia, que ainda provém majoritariamente de combustíveis fósseis. A queima dessas fontes libera grandes volumes de dióxido de carbono (CO_2), agravando o efeito estufa e o aquecimento global. Diante desse cenário, a transição energética (mudança gradual para fontes limpas) e a descarbonização da economia são urgentes. Essa necessidade está alinhada à Agenda 2030 da ONU, especificamente ao ODS 7 (energia limpa e acessível).

2.2 HIDROGÊNIO VERDE E ELETRÓLISE

O hidrogênio (H_2) é um vetor energético promissor, pois em sua utilização gera apenas água pura como subproduto, sem emissão de poluentes. O método de obtenção mais limpo é a eletrólise da água, que usa corrente elétrica de fontes renováveis (solar, eólica) para separar hidrogênio e oxigênio (H_2 e O_2) sem emissões de carbono, classificando-o como hidrogênio verde.

2.3 O DESAFIO DA QUALIDADE DA ÁGUA

A eficiência e durabilidade do processo de eletrólise dependem criticamente da pureza da água utilizada. Impurezas aumentam a resistência elétrica, causam corrosão nos eletrodos e membranas e reduzem a vida útil dos equipamentos. Os parâmetros de qualidade hídrica essenciais a serem



controlados são: Baixa condutividade (para evitar corrosão e depósitos); Mínimo Carbono Orgânico Total (TOC) (para proteger a membrana); Baixos teores de íons corrosivos (Na^+ e Cl^-) para prevenir corrosão; pH neutro (entre 6 e 8 para estabilidade).

2.4 SUSTENTABILIDADE E REUSO DE ÁGUAS RESIDUAIS

Dado que a água potável é limitada, o uso de águas residuais urbanas e industriais tratadas surge como uma alternativa sustentável para o abastecimento. Essa prática reduz a pressão sobre os recursos hídricos potáveis e contribui para o ODS 6 (uso sustentável da água). A água de reuso requer um tratamento avançado e multifásico (como ultrafiltração, osmose reversa, deionização e polimento final) para atingir a altíssima pureza exigida pelos eletrolisadores. Apesar do custo inicial elevado da infraestrutura de tratamento, o reuso é economicamente favorável e tecnicamente viável a longo prazo, por utilizar um recurso de baixo custo e reduzir a dependência de água potável. Em resumo, o hidrogênio verde é um avanço estratégico para a descarbonização, mas sua produção eficiente requer a máxima pureza da água, o que torna o reuso de águas residuais tratadas uma solução crucial para garantir a sustentabilidade e a viabilidade do processo.

3 METODOLOGIA

A pesquisa trata de um estudo bibliográfico conduzido entre agosto e novembro de 2025 nas bases de dados Periódico CAPES e Google Scholar. Os critérios de inclusão envolveram relatórios técnicos, documentos internacionais e artigos publicados entre 2016 e 2025, sendo excluídos trabalhos duplicados, publicações sem acesso ao texto completo e estudos que não apresentassem relação direta com o tema. Foram utilizadas as palavras-chave “transição energética”, “hidrogênio verde”, “eletrólise” e “qualidade da água”. Os textos foram submetidos a uma análise interpretativa com o objetivo de identificar os principais conceitos, resultados e tendências abordados pelos autores. As informações coletadas foram organizadas de forma comparativa, o que permitiu uma discussão crítica dos achados mais relevantes.

4 RESULTADOS E DISCUÇÕES

4.1 TRANSIÇÃO ENERGÉTICA E DESCARBONIZAÇÃO DO PLANETA

É fato que a humanidade já se adaptou ao estilo de vida em que os dispositivos e equipamentos proporcionados pelo cenário tecnológico atual estão inseridos, a ponto de que muitas das habilidades práticas, antes desenvolvidas, se tornaram obsoletas e saíram de uso, gerando uma população dependente dessas ferramentas. Essa dependência torna inviável a falta de qualquer um desses recursos, em especial a energia elétrica, que potencializa a grande maioria dos dispositivos,



equipamentos e ferramentas disponibilizados atualmente, sem este recurso praticamente nenhum desses pode ser utilizado ou mesmo produzido.

Apesar do conforto e do avanço proporcionados pela tecnologia, o custo ambiental para sua produção e manutenção tem sido cada vez mais elevado, especialmente devido ao uso intensivo de combustíveis fósseis, como carvão, petróleo e gás natural. A queima dessas fontes libera grandes quantidades de gases poluentes, entre eles o dióxido de carbono (CO₂), principal responsável pelo agravamento do efeito estufa. Desde a Primeira Revolução Industrial, o uso de combustíveis fósseis cresceu de forma acelerada, resultando em uma elevação contínua da concentração de gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera e, conseqüentemente, no aquecimento global. Embora o efeito estufa seja um fenômeno natural e essencial para a manutenção da vida na Terra, o excesso de emissões tem provocado desequilíbrios climáticos severos, afetando ecossistemas, fauna e flora de maneira, por vezes, irreversível.

De acordo com dados do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), as emissões globais aumentaram quase 65% entre 2005 e 2014, e, se políticas rigorosas não forem implementadas, as emissões de origem humana podem crescer entre 25% e 90% até 2030, elevando a temperatura média global entre 1,2 °C e 6,7 °C até 2100. Essa elevação pode gerar a elevação do nível do mar entre 20 e 61 centímetros, podendo chegar a mais de um metro com o derretimento das calotas polares (Olaitan et al., 2023).

Nesse contexto, a transição energética se mostra a medida mais urgente a ser tomada. Trata-se do processo de mudança gradual das fontes poluentes de energia para fontes renováveis e limpas. Essa mudança não deve ser vista apenas como uma ampliação do uso de fontes renováveis, mas como uma reformulação profunda do sistema energético global, que precisa evoluir de uma transição “renovável” para uma transição verdadeiramente “sustentável”, embora o consumo de energias renováveis tenha crescido nas últimas décadas, isso não tem sido suficiente para reduzir o uso de combustíveis fósseis nem as emissões de gases de efeito estufa, indicando que o atual modelo de transição ainda é limitado e desigual. É um dos pontos abordados pelos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), iniciativa global abrangente para enfrentar os desafios sociais, econômicos e ambientais e melhorar o bem-estar e as perspectivas das pessoas em todo o mundo. A ODS 7, especificamente, que enfatiza garantir o acesso à energia acessível, confiável, sustentável e moderna, determina na meta 7.2 (aumentar substancialmente a participação de energias renováveis na matriz energética global) a transição energética como um objetivo essencial a ser alcançado, acompanhada e respaldada pelas ODS 11 (Cidades e Comunidades Sustentáveis), 12 (Consumo e Produção Responsáveis) e 13 (Ação Contra a Mudança Global do Clima), que enfatizam a necessidade de integrar o consumo e produção sustentável, seja de energia ou qualquer outro insumo ou produto, na sociedade como um todo,



auxiliando na descarbonização do planeta a fim de prevenir as mudanças climáticas e suas consequências (Yang et al., 2024).

4.2 ENERGIA DO HIDROGÊNIO

A energia do hidrogênio destaca-se por ser abundante, ter alta densidade energética e baixo impacto ambiental, podendo alcançar emissões quase nulas em sua cadeia produtiva. Essa indústria envolve a produção, armazenamento, transporte e uso do hidrogênio em setores como transporte e química. Segundo a Comissão Internacional de Energia do Hidrogênio, o setor pode gerar 30 milhões de empregos até meados do século e movimentar mais de 2,5 trilhões de dólares, reduzindo 6 bilhões de toneladas de CO₂ e representando 20% do consumo energético global (Zhang; Jiang, 2023). O hidrogênio é considerado um vetor energético, dada a capacidade de suas moléculas de armazenar e transportar energia proveniente de outras fontes. Apesar de ser o gás mais abundante no universo e um dos mais abundantes no planeta, não é encontrado em sua forma pura na natureza, estando majoritariamente misturado a outras substâncias, como água (H₂O) e amônia (NH₃). Existem diversos métodos, limpos ou não, de separação para a obtenção do gás em condições próprias para uso; o hidrogênio gerado a partir desses diferentes meios é classificado por cores e a taxa de emissões de carbono gerada em cada processo.

Tabela 1: Classificação dos tipos de hidrogênio com base no seu método de produção

Cor	Método de Produção	Emissões de CO ₂	Fonte de Energia
Verde	Eletrólise da água com energia renovável	Nenhuma	Solar, eólica, hídrica
Cinza	Reforma a vapor do gás natural (sem captura de carbono)	Alta	Gás natural
Azul	Reforma a vapor com captura e armazenamento de carbono (CCS)	Moderada	Gás natural
Turquesa	Pirólise de metano (produção de carbono sólido)	Baixa	Gás natural/renovável
Laranja	Eletrólise com energia da biomassa (biomassa renovável ou resíduos)	Baixa	Biomassa
Branco	Hidrogênio natural (presente no subsolo de forma espontânea)	Nenhuma (natural)	Natural
Rosa	Eletrólise com energia nuclear	Baixa	Energia nuclear
Musgo	Mistura de renováveis e biomassa com técnicas de baixa emissão	Muito baixa	Fontes renováveis e biomassa
Marrom	Gaseificação de carvão (sem captura de carbono)	Muito alta	Carvão
Preto	Gaseificação de carvão betuminoso	Muito alta	Carvão betuminoso

Fonte: Acervo do autor

Dentro de uma célula de combustível, o hidrogênio reage com o oxigênio do ar. No ânodo, é dividido em prótons (H⁺) e elétrons (e⁻); os elétrons percorrem um circuito externo, gerando corrente elétrica enquanto os prótons atravessam o eletrólito e se unem ao oxigênio e aos elétrons no cátodo, formando água (H₂O) como subproduto. O resultado é a produção contínua de energia elétrica, calor e água pura, sem emissão de poluentes. Assim, podendo ser usado em veículos elétricos, indústrias e



sistemas de geração elétrica, o hidrogênio contribui para a transição energética e para a descarbonização da matriz mundial.

4.3 HIDROGÊNIO VERDE

Dado o objetivo de produzir energia de forma limpa, é contraproducente que, para a obtenção do vetor energético, o hidrogênio apresente altas taxas de emissão de gases poluentes, ou mesmo qualquer taxa, por menor que seja. Se o objetivo é fazer a transição para um setor energético livre de emissões, o ideal é que todo o processo seja limpo. Nesse contexto, o hidrogênio verde se mostra a opção mais promissora, sendo produzido de forma limpa por meio da eletrolise da água.

A eletrolise é o processo físico-químico em que, ao aplicar uma carga elétrica, as moléculas presentes na água, hidrogênio (H_2) e oxigênio (O_2), são separadas e armazenadas, obtendo-se, assim, os dois gases em sua forma pura. No entanto, a produção de hidrogênio por eletrólise da água enfrenta desafios relacionados à baixa eficiência energética, corrosão dos materiais e altos custos de operação. As perdas ôhmicas e sobrepotenciais reduzem o aproveitamento da energia elétrica, enquanto a formação de bolhas nos eletrodos dificulta a reação e aumenta as perdas. Além disso, o uso de eletrólitos concentrados pode causar degradação e corrosão dos eletrodos, comprometendo a durabilidade do sistema. Embora materiais nobres, como platina e ouro, ofereçam melhor desempenho, seu custo elevado limita a aplicação industrial, exigindo alternativas mais econômicas. Por fim, alguns eletrolisadores ainda apresentam problemas de estabilidade e vida útil reduzida, o que reforça a necessidade de avanços tecnológicos para tornar o processo mais eficiente, durável e viável economicamente (Pototschnig et al., 2016).

Os eletrolisadores de membrana de troca de prótons (PEM) se destacam como uma das tecnologias mais promissoras para a produção de hidrogênio verde, devido à sua alta eficiência, compactidade e rápida resposta operacional. Esse tipo de eletrolisador utiliza uma membrana polimérica sólida (geralmente de Nafion) que conduz íons H^+ do ânodo ao cátodo, permitindo uma operação livre de eletrólitos líquidos, o que reduz riscos de contaminação e simplifica o sistema (Samir Touili Ahmed Alami Merrouni, 2020). Tendo como materiais catalíticos mais comuns a platina e o irídio, que apresentam excelente desempenho eletroquímico, mas ainda representam um desafio devido ao alto custo e à escassez desses metais. O sistema opera tipicamente em temperaturas entre 50 e 80 °C, com eficiências de conversão entre 65% e 82%, sendo especialmente adequado para integração com fontes renováveis intermitentes, como a energia solar e eólica, pela sua rápida resposta às variações de carga.



4.4 QUALIDADE DA ÁGUA PARA ELETRÓLISE

Como é possível observar, a água é um elemento fundamental para o processo de eletrólise, sendo a “matéria-prima” da qual o gás é retirado. Nesse fato repousam outros desafios da produção de hidrogênio verde, o fornecimento e a qualidade da água a ser utilizada. Apesar da superfície terrestre estar praticamente coberta de água (cerca de 70%), apenas 3% são próprios para consumo. É um fato que em certos lugares do mundo há escassez do recurso, desencadeando problemas ambientais e sociais. Quando a água utilizada apresenta baixa qualidade, os desafios ligados à eficiência energética, à durabilidade dos materiais e aos custos operacionais do processo de eletrolise são intensificados. Impurezas, como sais, matéria orgânica e partículas suspensas, aumentam a resistência elétrica do eletrólito, favorecem a formação de depósitos nos eletrodos e agravam as perdas ôhmicas, reduzindo a eficiência do processo. Além disso, essas substâncias aceleram a corrosão e o desgaste dos materiais, comprometendo a estabilidade e a vida útil dos equipamentos. Desse ponto de vista, o abastecimento da produção deve ser feito de forma consciente, sem ignorar os parâmetros de qualidade da água exigidos para a produção de hidrogênio verde por eletrólise.

Tabela 2: Parâmetros de qualidade da água necessários para eletrólise

Parâmetro	Importância / Efeito	Valores típicos
Condutividade / Resistividade	Indica pureza da água; condutividade alta causa corrosão e depósitos.	$< 1 \mu\text{S}/\text{cm}$ ou $> 1 \text{ M}\Omega \cdot \text{cm}$ (ideal $\sim 18 \text{ M}\Omega \cdot \text{cm}$)
TOC (Carbono Orgânico Total)	Evita contaminação e degradação da membrana.	$< 50 \mu\text{g}/\text{L}$
Na^+ e Cl^-	Evita corrosão e subprodutos indesejados.	$< 5 \mu\text{g}/\text{L}$
Sílica (SiO_2)	Previne incrustações em eletrodos e membranas.	$\sim 3 \mu\text{g}/\text{L}$
Dureza (Ca^{2+}, Mg^{2+})	Evita depósitos e entupimentos.	Muito baixa
pH	Mantém estabilidade e reduz corrosão.	6–8 (PEM)
Oxigênio dissolvido	Evita corrosão interna.	Muito baixo / removido
Partículas sólidas	Protege membranas e eletrodos.	Água filtrada / ultrafiltrada
Temperatura	Garante eficiência e estabilidade.	25–30 °C

Fonte: Acervo do autor

A qualidade da água utilizada na eletrólise é fundamental para garantir o bom desempenho e a durabilidade do sistema. A condutividade deve ser muito baixa, pois indica alta pureza da água e evita interferências elétricas. O carbono orgânico total (TOC) precisa ser mínimo, prevenindo a contaminação da membrana e a formação de biofilmes. A presença de íons como sódio e cloreto deve ser reduzida ao máximo, já que esses elementos podem causar corrosão e gerar subprodutos indesejados. A sílica também deve estar quase ausente para evitar incrustações nos eletrodos e na membrana. A dureza da água, associada aos íons de cálcio e magnésio, precisa ser mínima a fim de impedir a formação de depósitos e o entupimento de componentes. O pH deve permanecer próximo da neutralidade, entre 6 e 8, assegurando a estabilidade química do sistema, especialmente em eletrolisadores PEM. Além disso, o oxigênio dissolvido deve ser reduzido para evitar corrosão interna,



e as partículas sólidas precisam ser totalmente removidas para proteger as superfícies ativas e as membranas. Por fim, a temperatura da água deve ser mantida controlada, garantindo a eficiência das reações e a estabilidade operacional do processo de eletrólise (Deepak Chauhan, 2023).

4.5 DIFERENTES FONTES DE ÁGUA

A água da rede pública se destaca como a fonte mais conveniente para instalações industriais de pequeno e médio porte, devido à qualidade controlada, estabilidade de fornecimento e menor necessidade de licenciamento ambiental. No entanto, para um fornecimento de água contínuo e consciente, utilizar a água potável que também é destinada ao consumo popular se mostra inviável (Simoes et al., 2021). Diferentes fontes podem ser utilizadas, cada uma com vantagens, limitações e exigências específicas de tratamento. A água doce, proveniente de rios, lagos ou lençóis subterrâneos, é a mais comum para alimentar os eletrolisadores, pois apresenta baixa salinidade e menor concentração de impurezas, reduzindo os custos de purificação. No entanto, sua disponibilidade está cada vez mais restrita, principalmente em regiões áridas ou sujeitas à escassez hídrica, o que impulsiona a busca por fontes alternativas, como água do mar, águas residuais tratadas e água de chuva. O uso de água do mar é tecnicamente viável, mas requer dessalinização prévia, geralmente por osmose reversa, para remover cloretos, sulfatos e outros sais que podem corroer eletrodos e membranas, reduzindo a eficiência e a vida útil do sistema. Esse processo adicional implica maior consumo energético e custos operacionais (Winter et al., 2022). Por outro lado, as águas residuais urbanas e industriais tratadas apresentam-se como uma alternativa sustentável, pois permitem reuso de recursos hídricos, reduzindo a pressão sobre fontes de água potável. Contudo, a presença de matéria orgânica, sólidos suspensos e metais pesados exige tratamentos avançados, como ultrafiltração, coagulação e osmose reversa, antes do uso no eletrolisador. Apesar de exigirem um processo de tratamento mais complexo, a integração de águas residuais e salobras tratadas representa um caminho promissor para garantir a sustentabilidade da produção de hidrogênio verde, especialmente em contextos de escassez hídrica e expansão da demanda energética.

4.6 TRATAMENTO DE ÁGUAS RESIDUAIS PARA ELETROLISE

Para ser considerada própria para eletrólise, a água deve apresentar um estado de altíssima pureza, pois íons e compostos orgânicos afetam o desempenho das células e reduzem a vida útil dos materiais de diferentes formas.



TABELA 3: Tipos de impurezas na água utilizada em processos eletrolíticos e seus efeitos

Categoria de impureza	Exemplos	Principais efeitos
Inorgânicas (íons)	Na^+ , Ca^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-}	Incrustações, corrosão, reações parasitas
Orgânicas	Ácidos húmicos, fenóis, óleos	Bloqueio de catalisadores, oxidação
Biológicas	Bactérias, biofilmes	Entupimento, alteração de pH
Coloidais	Sílica, areia, ferrugem	Bloqueio e abrasão
Metálicas (endógenas)	Ni, Fe, Cu, Cr	Envenenamento catalítico
Gases dissolvidos	CO_2 , O_2	Formação de carbonatos, oxidação

FONTE: Acervo do autor

O tratamento de água destinada à eletrólise, particularmente em eletrolisadores do tipo PEM, é composto por uma série de etapas sequenciais que visam garantir a pureza necessária à operação do sistema.

A primeira etapa é a pré-filtração, responsável pela remoção de sólidos suspensos, partículas e impurezas de maior dimensão. Essa etapa normalmente utiliza filtros de areia, carvão ativado ou membranas de microfiltração, que asseguram a eliminação de materiais particulados e compostos orgânicos de maior massa molecular. Em seguida, ocorre a osmose reversa, processo de separação por membrana que remove sais dissolvidos, íons metálicos e contaminantes inorgânicos. Embora seja altamente eficaz, essa etapa é considerada uma das mais custosas, tanto em termos de consumo energético quanto de custos de manutenção, devido à necessidade de limpeza e substituição periódica das membranas. A terceira fase, denominada deionização, utiliza resinas de troca iônica para a remoção de íons residuais, como Na^+ , Cl^- e Ca^{2+} , garantindo que a água atinja condutividade inferior a $1 \mu\text{S}/\text{cm}$, conforme exigido para sistemas PEM. Essa etapa requer monitoramento contínuo da resistividade da água e substituição regular das resinas, a fim de preservar o desempenho do processo. Depois, realiza-se o polimento final (ultrapurificação), etapa que emprega filtros submicrométricos e sistemas de radiação ultravioleta, destinados à eliminação de compostos orgânicos e microrganismos remanescentes. O resultado é uma água classificada como ASTM Tipo I, de altíssima pureza, adequada à operação de eletrolisadores sensíveis a impurezas. Por fim, a água é submetida à recirculação e monitoramento contínuo, garantindo estabilidade química e operacional. O sistema é equipado com sensores de condutividade, temperatura e pH, que detectam variações na qualidade da água em tempo real. Caso a condutividade aumente além dos limites estabelecidos, o fluxo é automaticamente desviado para reprocessamento, assegurando a integridade do sistema eletroquímico (Becker et al., 2023).

Na busca por fontes de água que não estejam destinadas ao consumo populacional, a utilização de águas de reuso pode contribuir significativamente para a redução da pressão sobre os recursos hídricos, ao mesmo tempo em que viabiliza uma produção de hidrogênio ambientalmente responsável. O uso de efluentes tratados em processos de eletrólise oferece diversas vantagens ambientais,



econômicas e técnicas, como, justamente, a redução do consumo de água potável, recurso limitado em várias regiões do planeta. A substituição da água doce por águas residuais tratadas representa uma medida eficaz de conservação hídrica. Além disso, a prática contribui para a diminuição da descarga de efluentes poluídos em corpos d'água, reduzindo a contaminação ambiental e fortalecendo políticas de gestão sustentável dos recursos hídricos. Além disso, do ponto de vista econômico, o reuso de águas residuais apresenta custos inferiores aos associados à captação e tratamento de água potável ou à dessalinização da água do mar. Em áreas urbanas e industriais, a infraestrutura já existente de estações de tratamento de esgoto (ETEs) pode ser adaptada para fornecer água tratada destinada à eletrólise, reduzindo investimentos em novos sistemas de abastecimento. Considerando que a purificação da água representa cerca de 20 a 25% do custo total de instalação e operação de um eletrolisador, os recursos monetários economizados ao utilizar as águas residuais na produção de hidrogênio por eletrólise em larga escala tornam essa alternativa ainda mais viável.

Como se trata de uma fonte diferente de água, o seu tratamento também será diferente. A estrutura de tratamento da água de reuso destinada à eletrólise compreende diversas etapas de purificação, cada uma com finalidades específicas e complementares. O processo inicia-se com o pré-tratamento, que tem por objetivo a remoção de sólidos suspensos e matéria orgânica. Nessa fase, são aplicados métodos físicos e biológicos, como gradeamento, sedimentação primária, tratamento biológico aeróbico e filtração por membranas (microfiltração ou ultrafiltração), assegurando baixa turbidez e a eliminação de microrganismos. Após o pré-tratamento, a água é submetida à etapa de remoção de contaminantes dissolvidos, na qual são empregados processos avançados de separação por membranas. A osmose reversa é amplamente utilizada nessa fase, sendo responsável pela remoção de sais, metais pesados e compostos orgânicos dissolvidos. Em seguida, aplica-se o processo de deionização ou eletrodeionização (EDI) que remove íons residuais (Na^+ , Cl^- , Ca^{2+} , Mg^{2+}). A EDI combina troca iônica e corrente elétrica contínua, eliminando a necessidade de regeneração química das resinas e mantendo a condutividade da água em níveis inferiores a $1 \mu\text{S}/\text{cm}$, conforme os padrões exigidos para eletrólise de alta eficiência. A última etapa, o polimento final ou ultrapurificação, visa eliminar traços de compostos orgânicos e microrganismos remanescentes, utilizando filtrações submicrométricas, adsorção em carvão ativado e radiação ultravioleta, além de monitoramento em tempo real dos parâmetros físico-químicos, como condutividade, pH e carbono orgânico total (TOC). Esse controle garante que a água tratada atenda integralmente às especificações requeridas pelos eletrolisadores, evitando danos aos componentes e preservando a eficiência do sistema (Merabet; Kerboua; Hoinkis, 2024).

Observa-se que os métodos de operação se diferenciam; o método aplicado à água de reuso representa uma cadeia de purificação completa, que transforma efluentes contaminados em água compatível com sistemas sensíveis como os eletrolisadores PEM. Trata-se de uma abordagem



sustentável e inovadora, voltada à redução do consumo de água potável. Já o método tradicional é um sistema de purificação contínua e manutenção da qualidade, empregado em plantas industriais que utilizam água já tratada ou destilada. Seu foco é garantir a estabilidade operacional, prevenindo a degradação das membranas e a corrosão dos eletrodos. A principal distinção entre os dois métodos reside no nível de contaminação inicial da água e, conseqüentemente, na complexidade tecnológica requerida. O tratamento de água de reuso é mais extenso e energeticamente exigente, pois envolve remoção de matéria orgânica, microrganismos e contaminantes dissolvidos em maior concentração, além de adotar tecnologias mais modernas, como a eletrodeionização. Em contrapartida, o tratamento convencional é direcionado à manutenção da pureza já existente, com foco em evitar o desgaste dos componentes eletroquímicos. Apesar dessas diferenças, ambos os sistemas são capazes de produzir água com elevado grau de pureza, essencial para garantir a durabilidade das membranas, prevenir processos corrosivos e assegurar a eficiência dos eletrolisadores.

O uso de água de reuso representa uma solução tecnologicamente viável e ambientalmente vantajosa para a produção de hidrogênio verde, ao passo que o tratamento convencional permanece essencial em instalações industriais já consolidadas, sendo considerado mais simples, eficiente e de menor custo quando a disponibilidade de água de boa qualidade não é um fator limitante.

4.7 INFRAESTRUTURA NECESSÁRIA PARA O USO DE ÁGUAS RESIDUAIS NA PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO VERDE

A implementação de um sistema eficiente de tratamento e purificação da água requer uma infraestrutura robusta e integrada à planta de produção de hidrogênio (Simoes et al., 2021). Essa estrutura deve incluir setor de tratamento correspondente à base da infraestrutura, sendo responsável por transformar efluentes tratados em água de alta pureza. Essa unidade deve estar integrada a estações de tratamento de esgoto (ETEs) já existentes, reduzindo custos e otimizando o aproveitamento dos recursos hídricos. Após a purificação, a água deve ser armazenada em tanques específicos construídos com materiais anticorrosivos e hermeticamente vedados, garantindo a estabilidade físico-química do fluido até o momento da eletrólise. A distribuição é feita através de sistemas de bombas e válvulas automatizadas, controladas digitalmente por softwares de automação. Esse conjunto permite o controle de vazão, pressão e direcionamento do fluxo, além de operar em sincronia com os sistemas de recirculação e reuso interno, que devolvem parte da água purificada ao processo, reduzindo o consumo total. Deve haver um setor de monitoramento e controle responsável pela supervisão contínua da qualidade da água e do desempenho dos equipamentos. Sensores de condutividade, pH, temperatura e carbono orgânico total (TOC) são instalados em pontos estratégicos da planta e conectados a sistemas automatizados que detectam e corrigem desvios em tempo real, assegurando a integridade dos eletrolisadores e evitando contaminações. Por fim, deve-se realizar o tratamento dos resíduos gerados



durante a operação, removendo metais, fluoretos e compostos orgânicos por meio de neutralização, precipitação química, filtração e desinfecção. Esse sistema pode reintroduzir a água tratada ao ciclo produtivo, promovendo a circularidade hídrica e reduzindo o impacto ambiental. Em conjunto, essas etapas formam uma infraestrutura autônoma, eficiente e sustentável, essencial para o uso seguro de águas residuais na produção de hidrogênio verde. Sua integração garante não apenas a continuidade do processo de eletrólise, mas também a consolidação de um modelo energético baseado na economia circular e na conservação dos recursos naturais.

Apesar de os custos de implementação e manutenção dessa infraestrutura representarem um dos principais desafios econômicos, visto que o investimento inicial é elevado, especialmente devido à necessidade de equipamentos de alta tecnologia, como sistemas de osmose reversa, eletroionização e sensores automatizados de controle de qualidade, o consumo energético desses dispositivos também impactar o custo operacional e a manutenção periódica de membranas e resinas representa um gasto recorrente que requer planejamento financeiro constante. A implementação de infraestrutura voltada ao uso de águas residuais na produção de hidrogênio verde também apresenta um conjunto de vantagens estratégicas a serem consideradas para sua viabilidade em larga escala. Essa infraestrutura, composta por setores de tratamento, armazenamento, distribuição, monitoramento e gestão de efluentes, exige altos investimentos iniciais, mas oferece retornos relevantes a médio e longo prazo, especialmente em contextos industriais e urbanos com grande disponibilidade de efluentes tratados.

Entre os principais benefícios econômicos, destaca-se a redução dos custos operacionais associados ao consumo de água potável, que representa um insumo estratégico e cada vez mais escasso em diversas regiões. O reaproveitamento de águas residuais permite que plantas de hidrogênio utilizem um recurso de baixo custo e de ampla disponibilidade, reduzindo a dependência de sistemas de abastecimento público e mitigando o impacto financeiro de tarifas e restrições hídricas. Além disso, ao integrar a produção de hidrogênio com estações de tratamento de esgoto, há um aproveitamento sinérgico da infraestrutura existente, o que diminui a necessidade de construção de novas redes de captação e transporte de água, reduzindo os custos de instalação e operação. Outro ponto positivo é o potencial econômico positivo, como a criação de empregos qualificados nas áreas de geração de externalidades de engenharia ambiental, automação industrial e gestão hídrica. A implantação de sistemas de monitoramento automatizado exige mão de obra especializada, incentivando a formação técnica e impulsionando setores ligados à inovação e à economia verde. Ademais, o uso de águas residuais contribui para a valorização de ativos ambientais e para o cumprimento de metas de sustentabilidade corporativa, fatores que podem atrair investimentos e facilitar o acesso a linhas de crédito voltadas a projetos de baixo carbono. Do ponto de vista macroeconômico, essa infraestrutura promove o fortalecimento da economia circular, na medida em que transforma resíduos em insumos produtivos, reduz a demanda por recursos naturais e diminui o volume de efluentes descartados no



meio ambiente. Tal abordagem contribui para a eficiência dos sistemas urbanos de saneamento e reforça a integração entre os setores de energia e gestão de recursos hídricos, criando novas cadeias de valor e oportunidades de cooperação público-privada.

5 CONCLUSÃO

A crescente dependência global dos recursos provenientes do cenário tecnológico atual gerou um consumo contínuo e cada vez mais intenso de energia elétrica. Para atender à demanda crescente, é necessária uma produção massiva ininterrupta que, por sua vez, depende de fontes não renováveis, em especial combustíveis fósseis, e processos altamente poluentes. O impacto ambiental decorrente do uso dessas fontes, especialmente pela emissão de gases de efeito estufa, reforça a urgência da transição energética e da descarbonização da economia mundial. Nesse cenário, a busca por alternativas limpas e sustentáveis torna-se essencial para garantir o equilíbrio entre desenvolvimento e preservação ambiental, alinhando-se aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) propostos pela ONU.

Entre as soluções emergentes, o hidrogênio verde destaca-se como um vetor energético estratégico, capaz de contribuir significativamente para a redução das emissões de carbono e para a diversificação da matriz energética global. Produzido a partir da eletrólise da água alimentada por fontes renováveis, o hidrogênio verde representa uma alternativa de alto potencial para substituir combustíveis fósseis em setores industriais, de transporte e geração elétrica. No entanto, a eficiência desse processo depende diretamente da qualidade da água utilizada, uma vez que impurezas podem comprometer a durabilidade dos eletrodos, a estabilidade das membranas e o desempenho geral do sistema eletrolítico.

O uso de águas residuais tratadas surge como uma solução promissora para suprir a demanda de água na produção de hidrogênio verde e constitui uma solução tecnicamente viável, economicamente favorável e ambientalmente sustentável, reduzindo a pressão sobre as fontes de água potável destinadas ao consumo humano. Quando corretamente tratadas, as águas residuais não comprometem o desempenho eletroquímico dos sistemas de eletrólise, apresentando resultados semelhantes aos obtidos com água deionizada convencional. O sucesso dessa abordagem depende da implementação de sistemas de tratamento multifásicos, compostos por etapas de pré-filtração, osmose reversa, deionização e polimento final, que assegurem a pureza exigida pelos processos eletrolíticos. Assim, além de reduzir a pressão sobre fontes de água potável, essa prática contribui para o aproveitamento de efluentes urbanos e industriais, promovendo a integração entre os setores de saneamento e energia. Dessa forma, a reutilização de águas residuais representa um avanço significativo na transição para uma economia de baixo carbono, reforçando o papel do hidrogênio verde como vetor energético do futuro. Contudo, a produção eficiente de hidrogênio verde a partir de



águas residuais depende de uma infraestrutura integrada e tecnologicamente avançada, composta por setores de tratamento, armazenamento, distribuição, monitoramento e gestão de efluentes. Essa estrutura garante a pureza necessária da água, o controle automatizado dos processos e a circularidade hídrica, fatores essenciais para a continuidade e a sustentabilidade do sistema. Embora a implantação dessa infraestrutura envolva custos elevados, sobretudo em função de tecnologias como a eletroionização e os sistemas automatizados de controle, os benefícios econômicos e ambientais superam as limitações iniciais. O reaproveitamento de efluentes tratados reduz os custos operacionais, valoriza os ativos ambientais e fomenta a geração de empregos qualificados nas áreas de engenharia, automação e gestão hídrica.

Dessa forma, a integração entre transição energética, gestão hídrica e inovação tecnológica constitui um eixo fundamental para o desenvolvimento sustentável. A utilização de águas residuais para a produção de hidrogênio verde representa um passo decisivo rumo à economia circular, permitindo a geração de energia limpa e de baixo impacto ambiental, ao mesmo tempo em que promove o uso racional dos recursos naturais. O avanço dessa tecnologia não apenas contribui para a preservação ambiental e combate às mudanças climáticas, mas também consolida um modelo de desenvolvimento que alia eficiência energética, sustentabilidade ambiental e viabilidade econômica, pilares indispensáveis para o futuro energético em todo o mundo.



REFERÊNCIAS

BECKER, Hans et al. Impact of impurities on water electrolysis: a review. *Sustainable Energy and Fuels*, [s. l.], v. 7, n. 7, p. 1565–1603, 2023.

DEEPAK CHAUHAN, Young Ho Ahn. Alkaline electrolysis of wastewater and low-quality water. [S. l.: s. n.], 2023.

MERABET, Nour Hane; KERBOUA, Kaouter; HOINKIS, Jan. Hydrogen production from wastewater: A comprehensive review of conventional and solar powered technologies. *Renewable Energy*, [s. l.], v. 226, n. August 2023, p. 120412, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.120412>.

OLAITAN, Olusola et al. Sustainable Chemistry for Climate Action Adsorbent technologies and applications for carbon capture , and direct air capture in environmental perspective and sustainable climate action. *Sustainable Chemistry for Climate Action*, [s. l.], v. 3, n. June, p. 100029, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scca.2023.100029>.

POTOTSCHNIG, By Alberto et al. Produção de hidrogênio por eletrólise alcaline da água e energia solar. *Fuel Cells Bulletin*, [s. l.], v. 2012, n. 1, p. 12–15, 2016.

SAMIR TOUILI AHMED ALAMI MERROUNI, Youssef El Hassouani Abdel-illah Amrani Samir Rachidi. Analysis of the yield and production cost of large-scale electrolytic hydrogen from different solar technologies and under several Moroccan climate zones. [S. l.: s. n.], 2020.

SIMOES, Sofia G. et al. Water availability and water usage solutions for electrolysis in hydrogen production. *Journal of Cleaner Production*, [s. l.], v. 315, n. November 2020, 2021.

WINTER, Lea R. et al. Mining Nontraditional Water Sources for a Distributed Hydrogen Economy. *Environmental Science and Technology*, [s. l.], v. 56, n. 15, p. 10577–10585, 2022.

YANG, Guanglei et al. Time for a change : Rethinking the global renewable energy transition from the Sustainable Development Goals and the Paris Climate Agreement. *The Innovation*, [s. l.], v. 5, n. 2, p. 100582, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.xinn.2024.100582>.

ZHANG, Gemeng; JIANG, Zhenqiang. Overview of hydrogen storage and transportation technology in China. *Unconventional Resources*, [s. l.], v. 3, n. June, p. 291–296, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.uncres.2023.07.001>.

