

AVANÇOS NA TECNOLOGIA DE ELETRÓLISE PEM PARA A PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO VERDE

N. E. Britto¹, A. Diório², P. Arroyo³,

¹Mestrando em Bioenergia, Universidade Estadual de Maringá (UEM), Maringá, Brasil
(nikekave12@hotmail.com)

²Coorientador, Universidade Estadual de Maringá (UEM), Maringá, Brasil

³Orientador, Universidade Estadual de Maringá (UEM), Maringá, Brasil

A eletrólise por Membrana de Troca de Prótons (PEM) destaca-se como uma tecnologia promissora para a produção de hidrogênio verde devido à elevada flexibilidade operacional e à integração com fontes renováveis. Aspectos relacionados à eficiência, materiais, custos e infraestrutura demonstram sua relevância para a descarbonização industrial e para o avanço de sistemas energéticos sustentáveis.

Palavras-chave: Acordo de Paris; Descarbonização; Eletrólise PEM; Hidrogênio Verde; Sustentabilidade.

INTRODUÇÃO

Desde a Revolução Industrial, o desenvolvimento econômico mundial esteve fortemente baseado no uso de combustíveis fósseis, como petróleo, carvão mineral e gás natural. Embora essas fontes tenham impulsionado avanços industriais e tecnológicos, sua utilização intensiva também provocou um aumento significativo na emissão de gases de efeito estufa, contribuindo para as mudanças climáticas globais (Agelin-Chaab, 2025). Como resposta a esse cenário, foi estabelecido em 2015 o Acordo de Paris, no qual diversos países assumiram o compromisso de reduzir emissões e limitar o aumento da temperatura média global, reforçando a necessidade de ampliar o uso de fontes de energia limpas e renováveis (IRENA, 2019).

Nesse contexto, o hidrogênio surge como uma alternativa estratégica para a transição energética, especialmente em setores industriais de difícil descarbonização. Apesar de ser o elemento mais abundante do universo, ele não é encontrado de forma isolada na natureza, sendo necessário extraí-lo de compostos como água e hidrocarbonetos (Souza Filho et al., 2026). Atualmente, grande parte da produção mundial ocorre por meio de processos derivados do gás natural, conhecidos como produção de hidrogênio cinza, que geram elevadas emissões de dióxido de carbono. Em contrapartida, o hidrogênio verde é produzido por eletrólise da água utilizando eletricidade proveniente exclusivamente de fontes renováveis, reduzindo significativamente os impactos

ambientais e emitindo apenas oxigênio como subproduto (Lin et al., 2025).

A eficiência desse processo está diretamente relacionada à tecnologia empregada nos eletrolisadores. Entre as alternativas disponíveis, a eletrólise por Membrana de Troca de Prótons (PEM) tem recebido destaque devido à sua elevada flexibilidade operacional e capacidade de responder rapidamente às variações na geração de energia solar e eólica. Essa característica torna a tecnologia particularmente adequada para integração com fontes renováveis intermitentes, favorecendo maior estabilidade operacional e melhor desempenho do sistema (Zerrougui et al., 2025).

Diante desse cenário, este trabalho tem como objetivo realizar uma revisão sistemática e didática sobre o estado da arte da tecnologia PEM aplicada à produção de hidrogênio verde. De forma específica, busca-se apresentar os princípios de funcionamento e a estrutura dos componentes responsáveis pela eficiência do sistema e discutir os principais desafios técnicos e ambientais relacionados à expansão dessa tecnologia.

MATERIAL E MÉTODOS

A presente pesquisa caracterizou-se como uma revisão teórica, de natureza exploratória e documental, desenvolvida com o objetivo de reunir e sistematizar o conhecimento científico disponível sobre a tecnologia de eletrólise por Membrana de Troca de Prótons (PEM, *Proton Exchange*

Membrane) aplicada à produção de hidrogênio verde. O estudo contemplou evidências científicas e documentos técnicos relacionados aos aspectos tecnológicos, operacionais, ambientais e econômicos dessa tecnologia, subsidiando a construção do referencial teórico da pesquisa.

A busca bibliográfica foi realizada exclusivamente na base de dados *ScienceDirect*, utilizando os operadores booleanos *AND* e *OR* para a combinação dos termos *PEM electrolysis*, *green hydrogen*, *proton exchange membrane*, *water electrolysis*, *sustainability* e *life cycle assessment*. O recorte temporal compreendeu publicações entre 2014 e 2024, priorizando estudos representativos dos avanços tecnológicos mais recentes. Trabalhos publicados fora desse intervalo também foram incluídos quando considerados essenciais para a contextualização histórica e conceitual do tema.

Foram selecionados artigos científicos publicados em periódicos revisados por pares (*peer review*). A análise iniciou-se pela avaliação dos títulos e resumos, seguida da leitura integral das publicações selecionadas. Como critérios de exclusão, desconsideraram-se documentos duplicados, patentes, estudos sem revisão por pares e publicações que não apresentavam aderência ao contexto da produção de hidrogênio por eletrólise ou às suas aplicações energéticas e industriais.

Complementarmente, incorporaram-se documentos técnicos elaborados pela Agência Internacional de Energia Renovável (IRENA, *International Renewable Energy Agency*) e pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), em razão da reconhecida relevância dessas instituições na disponibilização de indicadores técnicos, econômicos e energéticos amplamente utilizados como referência internacional e nacional.

A análise qualitativa concentrou-se na arquitetura dos eletrolisadores PEM, nos materiais empregados, nos componentes do sistema, nos requisitos operacionais, nos sistemas auxiliares *Balance of Plant* (BoP), na integração com fontes renováveis, nos métodos de armazenamento e transporte do hidrogênio, na comparação entre as principais tecnologias de eletrólise, nos aspectos ambientais associados à Avaliação do Ciclo de Vida (ACV, *Life Cycle Assessment*), no Custo Nivelado do Hidrogênio (LCOH, *Levelized Cost of Hydrogen*) e no contexto regulatório brasileiro. A síntese das informações permitiu reunir os principais avanços tecnológicos, limitações operacionais e desafios econômicos associados à produção de hidrogênio verde por eletrólise PEM, fornecendo o embasamento científico para as análises desenvolvidas neste trabalho.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Hidrogênio como Vetor Energético na Transição Sustentável

O hidrogênio é o elemento químico mais simples e abundante do universo, sendo formado por um próton e um elétron (Valenti, 2023). Apesar dessa abundância, ele não é encontrado em grandes quantidades na forma gasosa livre, estando geralmente associado a outras substâncias, como água, hidrocarbonetos e biomassa. Dessa forma, sua utilização como fonte energética depende de processos capazes de extrair-lo desses compostos (Souza Filho *et al.*, 2026).

O hidrogênio é um dos elementos de maior interesse para aplicações energéticas. Esse interesse está relacionado principalmente às suas propriedades físico-químicas. Entre suas principais características destaca-se a elevada densidade energética por unidade de massa, cerca de 120 MJ/kg (megajoules por quilograma), valor superior ao de combustíveis convencionais como gasolina e diesel (Castro *et al.*, 2023). Entretanto, apesar de armazenar grande quantidade de energia em relação à massa, o hidrogênio apresenta baixa densidade volumétrica em condições normais de temperatura e pressão. Na prática, isso significa que grandes volumes são necessários para armazenar quantidades úteis de energia. Para superar essa limitação, normalmente são utilizados sistemas de compressão em altas pressões ou processos de liquefação em temperaturas extremamente baixas (Souza Filho *et al.*, 2026).

Atualmente, o hidrogênio é considerado um importante vetor energético, funcionando como um meio de armazenar e transportar energia produzida por outras fontes. Diferentemente da energia solar e eólica, classificadas como fontes primárias, o hidrogênio permite converter a eletricidade excedente em energia química por meio da eletrólise da água, possibilitando seu armazenamento por longos períodos (Hamiche *et al.*, 2025).

Essa característica amplia sua importância na transição energética, principalmente em setores industriais de difícil descarbonização, como a siderurgia, a produção de fertilizantes e processos industriais com elevada demanda térmica. Além disso, sua utilização requer medidas específicas de segurança devido a características como alta inflamabilidade e elevada capacidade de difusão. Dessa forma, o hidrogênio é considerado um elemento estratégico para reduzir emissões e apoiar a construção de sistemas energéticos mais sustentáveis (Souza Filho *et al.*, 2026).

Classificação por Cores e Hierarquia de Descarbonização do Hidrogênio

A produção de hidrogênio é frequentemente classificada por meio de uma convenção conhecida como paleta de cores, utilizada para diferenciar as rotas produtivas de acordo com a matéria-prima empregada, a fonte de energia utilizada e o nível de emissões geradas durante o processo (IRENA –

International Renewable Energy Agency, 2019). Essa classificação não está relacionada às características físicas do hidrogênio, mas ao impacto ambiental associado ao método empregado em sua produção (EPE – Empresa de Pesquisa Energética, 2022). A Tabela 1 apresenta as principais características associadas às diferentes nomenclaturas de cores utilizadas para classificar o hidrogênio.

Tabela 1 - Espectro de Cores do Hidrogênio

Cor	Processo de Geração	Fonte	Perfil de Emissões
Verde	Eletrólise da água	Energias Renováveis	Zero emissões diretas
Azul	Reforma a vapor	Fóssil	Emissões reduzidas (80-90%)
Cinza	Reforma a Vapor de Metano	Gás Natural (Metano)	Altas emissões (~10 kg /kg)
Turquesa	Pirólise do metano	Gás Natural + Calor	Produz carbono sólido
Rosa	Eletrólise da água	Energia Nuclear	Baixas emissões
Amarelo	Eletrólise da água	Energia Elétrica	Depende do mix da rede
Preto/Marrom	Gaseificação de carvão	Carvão mineral	Altíssimas emissões (14-25 kg /kg)
Branco	Extração natural	Depósitos geológicos	Sem emissões de processo

Fonte: Elaborado pelo autor com base em Castro et al. (2023) e EPE (2022).

Entre as principais rotas utilizadas atualmente destacam-se o hidrogênio cinza e o hidrogênio marrom, produzidos a partir do gás natural e do carvão mineral, respectivamente. Apesar dos menores custos de produção, esses métodos estão associados a elevadas emissões de dióxido de carbono, contribuindo significativamente para os impactos ambientais e para o aumento dos gases de efeito estufa (Hamiche *et al.*, 2025).

Como alternativa intermediária, destaca-se o hidrogênio azul, que utiliza processos semelhantes aos empregados no hidrogênio cinza, porém associados a tecnologias de Captura e Armazenamento de Carbono (CCS – *Carbon Capture and Storage*). Essa estratégia permite reduzir parte das emissões geradas durante a produção. Além disso, outras rotas também vêm sendo investigadas, como o hidrogênio turquesa, produzido por processos capazes de converter o carbono em sua forma sólida, reduzindo as emissões diretas de dióxido de carbono (Azevedo *et al.*, 2023).

Entre as diferentes rotas existentes, o hidrogênio verde tem recebido maior destaque devido ao menor impacto ambiental associado ao seu processo produtivo. Sua produção ocorre por meio da eletrólise da água utilizando energia proveniente de fontes renováveis, como solar e eólica. Nesse processo, o principal subproduto gerado é o oxigênio,

tornando essa alternativa uma das mais promissoras para a redução das emissões de carbono e para o

avanço da transição energética global (Lin *et al.*, 2025).

Além dessas classificações, estudos recentes também mencionam outras categorias, como o hidrogênio branco, obtido a partir de reservas naturais, e o hidrogênio rosa, produzido por eletrólise alimentada por energia nuclear. Independentemente da rota utilizada, a viabilidade da produção depende de fatores como custo da energia, desenvolvimento tecnológico e políticas de incentivo. Nesse contexto, o hidrogênio verde apresenta elevado potencial para contribuir para o desenvolvimento de uma matriz energética mais limpa e sustentável (Castro *et al.*, 2023).

Armazenamento, Transporte e Penalidade Energética do Hidrogênio

A viabilidade comercial do hidrogênio verde depende diretamente da superação de desafios relacionados ao armazenamento e ao transporte. Apesar de apresentar elevada densidade energética por unidade de massa, o hidrogênio possui baixa densidade volumétrica em condições ambientes, dificultando o armazenamento e a movimentação de grandes quantidades. Dessa forma, processos de densificação tornam-se necessários para viabilizar sua utilização em escala industrial e comercial (Valenti, 2023).

Entre os métodos mais utilizados destacam-se a compressão e a liquefação. O hidrogênio gasoso comprimido representa uma tecnologia consolidada, baseada no armazenamento sob altas pressões. Em contrapartida, o hidrogênio líquido apresenta maior densidade energética por volume, porém exige

temperaturas extremamente baixas para sua obtenção, o que eleva significativamente o consumo energético do processo (Aditiya *et al.*, 2026). Na Tabela 2 é possível observar os principais métodos de armazenamento e transporte de hidrogênio.

Tabela 2 - Métodos de Armazenamento e Transporte

Método	Estado Físico	Vantagens	Desvantagens / Desafios
Gás Comprimido	Gasoso (350-700 bar)	Tecnologia madura; carga rápida	Baixa densidade volumétrica; custo de tanques
Hidrogênio Líquido	Líquido (-253 °C)	Alta densidade volumétrica	Gasto de ~30% da energia na liquefação
Amônia Verde	Químico ()	Infraestrutura global existente	Toxicidade; perda energética na reconversão
LOHC (Carreadores de Hidrogênio Orgânicos Líquidos)	Químico (Líquido)	Estável; compatível com logística fóssil	Desidrogenação exige muito calor (350 °C)

Fonte: Elaborado pelo autor com base em Castro et al. (2023), Souza Filho et al. (2026) e Santos et al. (2026).

Além do armazenamento direto, outras alternativas utilizam compostos químicos capazes de transportar hidrogênio de forma mais eficiente. Entre os principais exemplos destacam-se a amônia verde, o metanol e os transportadores orgânicos líquidos de hidrogênio (LOHC – *Liquid Organic Hydrogen Carriers*). A amônia tem recebido maior destaque devido à existência de infraestrutura consolidada para armazenamento e transporte em larga escala (Castro *et al.*, 2023). Entretanto, os processos de conversão e posterior recuperação do hidrogênio podem resultar em perdas energéticas significativas, fenômeno conhecido como penalidade energética (Aditiya *et al.*, 2026).

No contexto da produção e exportação em larga escala, estruturas como gasodutos dedicados e instalações portuárias especializadas são consideradas alternativas estratégicas para reduzir custos logísticos (Castro *et al.*, 2023). Nesse cenário, o Brasil apresenta potencial competitivo em função do desenvolvimento de polos voltados ao hidrogênio verde e da proximidade entre recursos renováveis e infraestrutura de exportação. Além dos desafios logísticos, aspectos relacionados à segurança também devem ser considerados, uma vez que as propriedades físicas do hidrogênio exigem materiais e sistemas capazes de minimizar riscos durante o armazenamento e transporte. Dessa forma, a definição da rota logística mais adequada depende do equilíbrio entre eficiência energética, custos de implementação e maturidade tecnológica, fatores essenciais para a expansão sustentável do mercado de hidrogênio (Brannstrom *et al.*, 2026).

Governança, Marco Regulatório e Certificação de Origem

O desenvolvimento de uma economia baseada em hidrogênio verde não depende apenas dos avanços tecnológicos relacionados à produção do combustível, mas também da existência de um ambiente institucional e regulatório capaz de garantir segurança jurídica e estimular investimentos. No Brasil, universidades e centros de pesquisa desempenham papel importante no avanço de tecnologias relacionadas à produção, ao armazenamento e à utilização do hidrogênio. Além disso, entidades ligadas ao setor industrial atuam como intermediárias entre as demandas do mercado e a formulação de políticas públicas, contribuindo para a expansão do setor e para a construção de estratégias nacionais voltadas ao hidrogênio verde (Castro *et al.*, 2023).

O crescimento do setor também está associado à implementação de políticas públicas e mecanismos regulatórios adequados. Nesse contexto, a promulgação da Lei nº 14.948/2024 representou um marco importante para a estruturação do mercado nacional de hidrogênio de baixa emissão de carbono, estabelecendo diretrizes para o desenvolvimento do setor e incentivos voltados à atração de investimentos. Essas medidas integram iniciativas mais amplas destinadas a fortalecer a participação do Brasil no mercado internacional de energia limpa (Souza Filho *et al.*, 2026).

Outro aspecto fundamental refere-se à certificação de origem do hidrogênio produzido. Esse processo permite verificar a intensidade das emissões

associadas ao combustível ao longo de sua cadeia produtiva, garantindo maior transparência e confiabilidade ao mercado. Adicionalmente, mecanismos de certificação e créditos relacionados à descarbonização podem agregar valor econômico aos projetos e incentivar práticas mais sustentáveis. Dessa forma, a integração entre pesquisa científica, desenvolvimento tecnológico, políticas públicas e sistemas de certificação é considerada essencial para ampliar a competitividade do hidrogênio verde e consolidar sua participação na transição energética global (CertifHy, 2022).

Arquitetura da Tecnologia PEM: Componentes, Materiais e Desafios Catalíticos

A tecnologia de eletrólise por Membrana de Troca de Prótons (PEM – *Proton Exchange Membrane*) baseia-se no uso de um eletrólito sólido polimérico, geralmente constituído por membranas de ácido perfluorossulfônico, como o Nafion (Gabriel, 2020). Em comparação com sistemas alcalinos convencionais, essa configuração elimina o uso de eletrólitos líquidos corrosivos, resultando em sistemas mais compactos, seguros e adequados a aplicações de alta eficiência (Castro *et al.*, 2023). O elemento central do eletrolisador é o conjunto eletrodo-membrana (MEA – *Membrane Electrode Assembly*), no qual a membrana atua como isolante eletrônico e permite apenas o transporte seletivo de prótons (Lin *et al.*, 2025).

O desempenho eletroquímico do sistema depende do uso de catalisadores específicos em cada eletrodo. No ânodo, o irídio é empregado para a reação de desprendimento de oxigênio (OER – *Oxygen Evolution Reaction*), enquanto no cátodo a platina é utilizada para a formação de hidrogênio (HER – *Hydrogen Evolution Reaction*) (Inaba *et al.*, 2026). A dependência de metais nobres constitui um dos principais gargalos tecnológicos da rota PEM, devido ao elevado custo e à limitação de disponibilidade desses materiais críticos (Zerrougui *et al.*, 2025).

Os eletrolisadores PEM operam em altas densidades de corrente, o que possibilita maior produção de hidrogênio por área instalada. Essa tecnologia também permite a obtenção de hidrogênio com alta pureza, atendendo requisitos de aplicações industriais e de células a combustível (Valenti, 2023). A estrutura do *stack* (pilha de eletrólise) inclui placas bipolares e camadas de difusão de gás (GDL – *Gas Diffusion Layers*), responsáveis pela distribuição dos reagentes e pela condução eficiente de corrente elétrica (Aditya *et al.*, 2026).

No que se refere à durabilidade, os principais mecanismos de degradação estão associados à contaminação por impurezas e ao estresse operacional prolongado (Nemeth *et al.*, 2026). A

qualidade da água de alimentação e o controle rigoroso das condições operacionais são determinantes para a manutenção do desempenho e para o aumento da vida útil dos sistemas (Schneider *et al.*, 2026). A fabricação dos catalisadores e demais componentes baseados em metais nobres representa parcela significativa dos impactos ambientais associados à tecnologia PEM (Zhuang e Li, 2026).

Resposta Dinâmica e Flexibilidade Operacional da Tecnologia PEM

A tecnologia de eletrólise por Membrana de Troca de Prótons (PEM – *Proton Exchange Membrane*) apresenta como principal diferencial em relação aos sistemas alcalinos tradicionais a elevada flexibilidade operacional. Diferentemente dos eletrolisadores alcalinos, que operam em faixas mais restritas de carga e possuem resposta mais lenta às variações de operação, os sistemas PEM mantêm estabilidade e desempenho em amplas faixas de potência. Essa característica permite o acompanhamento de variações rápidas de geração associadas a fontes renováveis, como solar e eólica (Hamiche *et al.*, 2025).

O comportamento dinâmico do sistema está associado às propriedades da membrana de troca de prótons e à ausência de eletrólitos líquidos, reduzindo a inércia operacional do processo (Lin *et al.*, 2025). Em comparação, tecnologias como os eletrolisadores de óxido sólido (SOEC – *Solid Oxide Electrolyzer Cells*) dependem de altas temperaturas de operação, o que limita sua capacidade de resposta a variações bruscas de carga (Tenhumberg e Bükér, 2020). Adicionalmente, os sistemas PEM apresentam vantagens em termos de segurança operacional, com menor risco de mistura de gases e manutenção de altos níveis de pureza do hidrogênio produzido (Shiva Kumar e Himabindu, 2019).

A flexibilidade operacional amplia o potencial de aplicação da tecnologia em sistemas energéticos modernos, permitindo o aproveitamento de excedentes de geração renovável e contribuindo para o equilíbrio de redes elétricas. Essa característica favorece sua integração em sistemas inteligentes de energia e em ambientes de geração distribuída (IRENA – *International Renewable Energy Agency*, 2019).

Observa-se ainda que a eficiência dos eletrolisadores PEM se mantém elevada mesmo em operação sob carga parcial, com melhor aproveitamento da energia disponível (Zhuang e Li, 2026). Essa condição reduz custos associados à produção de hidrogênio e diminui a necessidade de sistemas adicionais de armazenamento para estabilização energética (Gagliardi e Venturini, 2026).

Balance of Plant e Gestão Hídrica em Sistemas de Eletrolise PEM

A operação de uma planta de hidrogênio verde depende não apenas do eletrolisador, mas também da integração dos sistemas auxiliares conhecidos como *Balance of Plant* (BoP). Esse conjunto garante as condições necessárias para a eletrolise, incluindo fornecimento de energia, controle térmico e qualidade dos insumos (Castro *et al.*, 2023).

O sistema de processamento de energia realiza a conversão de corrente alternada (CA) em corrente contínua (CC) por meio de transformadores e retificadores, ajustando parâmetros elétricos para proteger o *stack* e evitar degradação das membranas. Essa etapa é crítica para a estabilidade operacional da planta (Hamiche *et al.*, 2025).

Na gestão térmica, trocadores de calor e sistemas de resfriamento mantêm a temperatura do *stack* em faixas controladas, geralmente entre 50 °C e 80 °C. Esse controle é essencial para garantir eficiência eletroquímica e reduzir o estresse térmico dos componentes (Zerrougui *et al.*, 2025).

A gestão hídrica é um dos pontos mais sensíveis da tecnologia PEM, devido à necessidade de água

ultrapura para evitar a contaminação das membranas e dos catalisadores. Sistemas como osmose reversa e eletrodeionização (EDI) são utilizados para garantir a qualidade exigida pelo processo (Zhuang e Li, 2026).

As etapas de pós-processamento incluem secagem e desoxigenação do gás, permitindo atingir níveis de pureza superiores a 99,99% (Valenti, 2023). Além disso, a compressão para armazenamento representa parcela relevante do consumo energético total da planta (Schneider *et al.*, 2026).

Análise Comparativa das Tecnologias de Eletrolise

A escolha da rota de eletrolise não depende apenas da eficiência elétrica, mas também de fatores como custo de implantação, flexibilidade operacional, durabilidade dos materiais e maturidade tecnológica. Nesse cenário, as tecnologias Alcalina, PEM, Óxido Sólido (SOEC) e Membrana de Troca Aniônica (AEM – *Anion Exchange Membrane*) ocupam posições distintas no desenvolvimento da economia do hidrogênio (Abdelghany *et al.*, 2026). A Tabela 3 apresenta uma comparação entre as principais tecnologias de eletrolise utilizadas na produção de hidrogênio.

Tabela 3 - Comparativo das Tecnologias de Eletrolise

Característica	AWE (Eletrolise Alcalina da Água)	PEM (Membrana de Troca de Prótons)	SOEC (Célula de Eletrolise de Óxido Sólido)
Maturidade	TRL (Nível de Maturidade Tecnológica) 9	TRL (Nível de Maturidade Tecnológica) 7-8	TRL (Nível de Maturidade Tecnológica) 5-7
Eficiência	62% - 82% (LHV - Poder Calorífico Inferior)	65% - 80% (LHV - Poder Calorífico Inferior)	80% - 90% (LHV - Poder Calorífico Inferior)
Resposta Dinâmica	Lenta (minutos)	Rápida (milissegundos)	Moderada (requer calor)
Pressão de Saída	1 - 30 bar	30 - 80 bar	1 - 15 bar
Vantagens	Baixo CAPEX (Custo de Capital); Ni (Níquel)	Compacto; ideal para intermitência	Alta eficiência; usa calor residual
Desafios	Eletrólito corrosivo; partida lenta	Metais nobres (Pt - Platina, Ir - Irídio)	Alta temperatura; degradação térmica

Fonte: Elaborado pelo autor com base em IRENA (2019), Lin *et al.* (2025) e Hamiche *et al.* (2025).

A eletrolise alcalina é a opção mais consolidada em escala industrial, utilizando eletrólitos líquidos como KOH (hidróxido de potássio) e catalisadores de baixo custo, como o níquel. Seu principal ponto forte é o baixo custo de capital, porém apresenta menor densidade de corrente e resposta mais lenta a variações de carga, o que limita sua integração com fontes renováveis intermitentes (Lin *et al.*, 2025).

A tecnologia PEM apresenta maior densidade de corrente e resposta dinâmica significativamente mais rápida, o que favorece sua aplicação em sistemas com forte variabilidade de geração renovável. Apesar do custo mais elevado devido ao uso de metais do grupo da platina, sua configuração compacta e operação em alta pressão reduzem a necessidade de sistemas adicionais de compressão (Lin *et al.*, 2025).

As células de óxido sólido apresentam as maiores eficiências termodinâmicas entre as tecnologias analisadas, devido à operação em altas temperaturas e uso de vapor de água no processo de eletrólise. No entanto, essa condição operacional ainda impõe limitações de durabilidade e estabilidade dos materiais cerâmicos, reduzindo sua maturidade tecnológica (Hamiche *et al.*, 2025).

A tecnologia AEM surge como alternativa emergente, combinando características das rotas alcalina e PEM, com potencial de redução de custos por permitir o uso de materiais não nobres. Apesar disso, ainda enfrenta desafios relacionados à estabilidade e vida útil, permanecendo em fase de desenvolvimento tecnológico (Zhao *et al.*, 2026).

De forma geral, AWE (eletrólise de água alcalina) e PEM apresentam maior maturidade comercial, enquanto SOEC e AEM ainda estão em desenvolvimento, com potencial de aplicação futura em larga escala (Souza Filho *et al.*, 2026). A análise indica que a PEM se destaca como a rota mais versátil para integração com fontes renováveis, enquanto a AWE mantém vantagem em projetos de grande escala e menor custo inicial (Aditiya *et al.*, 2026).

Ecosistema Brasileiro: Cadeia de Valor e Governança do Hidrogênio Verde

O ecossistema brasileiro voltado ao hidrogênio verde é composto por uma rede ampla de instituições envolvendo governo, academia e setor produtivo, com cerca de 172 agentes distribuídos ao longo da cadeia de valor (Castro *et al.*, 2023). Essa estrutura inclui desde pesquisa básica até operação industrial e políticas de exportação, evidenciando um sistema já articulado em múltiplos níveis (Brannstrom *et al.*, 2026).

No eixo científico e tecnológico, destacam-se centros como o PTI (Parque Tecnológico Itaipu), o CEPEL (Centro de Pesquisas de Energia Elétrica) e o IPEN (Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares), responsáveis pelo desenvolvimento de materiais e soluções em eletrocatalise e eletrólise (Castro *et al.*, 2023). Em paralelo, universidades como UNICAMP (Universidade Estadual de Campinas), USP (Universidade de São Paulo) e UFRJ (Universidade Federal do Rio de Janeiro) concentram grupos de pesquisa voltados à eletroquímica e tecnologias de hidrogênio, reforçando a base científica nacional (Brannstrom *et al.*, 2026).

A articulação entre academia, indústria e governo ocorre por meio de associações setoriais como a ABH2 (Associação Brasileira do Hidrogênio), a ABIQUIM (Associação Brasileira da Indústria Química) e a ABIMAQ (Associação Brasileira da

Indústria de Máquinas e Equipamentos), que atuam na estruturação do mercado e na formulação de políticas públicas (Castro *et al.*, 2023). Essas entidades contribuem diretamente para a redução de barreiras regulatórias e atração de investimentos no setor (Bruschi *et al.*, 2026).

No setor industrial, projetos de P&D (Pesquisa e Desenvolvimento) financiados pela ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) têm viabilizado a aplicação de tecnologias como a eletrólise PEM em escala piloto e pré-comercial (Castro *et al.*, 2023). Paralelamente, o Brasil tem estruturado *hubs* (polos integrados) de hidrogênio em regiões portuárias estratégicas, integrando geração renovável e logística de exportação (Brannstrom *et al.*, 2026).

Entre esses polos, o Porto do Pecém se destaca como principal *hub* emergente, com forte atração de investimentos internacionais voltados ao mercado europeu de energia limpa (Schneider *et al.*, 2026). Esse movimento reforça o posicionamento do Brasil como potencial exportador de hidrogênio verde em larga escala (Brannstrom *et al.*, 2026).

No campo regulatório, a Lei nº 14.948/2024 e o programa Rehidro (Regime Especial de Incentivos para a Produção de Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono) estabeleceram diretrizes para segurança jurídica e incentivo ao investimento no setor (Souza Filho *et al.*, 2026). Essas políticas são complementadas pelo PNH2 (Programa Nacional do Hidrogênio), que integra metas climáticas e estratégias nacionais de desenvolvimento energético. De forma geral, a integração entre instituições, infraestrutura e regulação consolida um ecossistema competitivo, posicionando o Brasil com elevado potencial de produção de hidrogênio verde de baixo custo e baixa intensidade de carbono (Santos *et al.*, 2026).

Sensibilidade Econômica, LCOH e Monetização de Atributos Ambientais (CBIO)

A viabilidade econômica das plantas de hidrogênio verde é usualmente avaliada pelo Custo Nivelado do Hidrogênio (LCOH – *Levelized Cost of Hydrogen*), indicador que representa o preço mínimo necessário para cobrir todos os custos ao longo do ciclo de vida do projeto e assegurar a taxa de retorno esperada pelos investidores. Sua formulação é baseada na metodologia de Fluxo de Caixa Descontado (DCF – *Discounted Cash Flow*), o que permite incorporar a dimensão temporal do capital em horizontes operacionais típicos de 20 a 30 anos (Souza Filho *et al.*, 2026).

Os resultados indicam que o custo da eletricidade renovável é o principal componente do LCOH,

podendo representar entre 30% e 60% do custo total em sistemas dedicados. Nesse contexto, observa-se uma forte sensibilidade do indicador ao fator de capacidade do eletrolisador, uma vez que pequenas variações na disponibilidade das fontes renováveis têm impacto significativo no custo final do hidrogênio (Inage e Yanagisawa, 2026).

O escalonamento industrial também exerce papel determinante na redução do LCOH. Evidências apontam que a ampliação da capacidade instalada promove ganhos expressivos de competitividade, com reduções relevantes no custo unitário do hidrogênio à medida que o sistema avança para escalas industriais. No contexto brasileiro, estudos de caso aplicados ao Porto do Pecém indicam valores de LCOH na ordem de R\$ 16,39/kg, situando-se dentro da faixa superior observada para tecnologias atuais, mas ainda dependente de condições de financiamento e preço da energia (Castro *et al.*, 2023).

As análises de sensibilidade mostram que, além do custo da eletricidade, o CAPEX (investimento em bens de capital) dos eletrolisadores e os custos de substituição dos *stacks* são variáveis críticas na incerteza financeira dos projetos. A tecnologia PEM apresenta uma vantagem relativa ao operar em maiores pressões de saída, reduzindo a necessidade de sistemas adicionais de compressão e, consequentemente, o custo global do sistema (Gagliardi e Venturini, 2026).

No âmbito regulatório e de monetização ambiental, destaca-se a integração com a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio) por meio dos Créditos de Descarbonização (CBIO). Esses créditos representam a emissão evitada de uma tonelada de CO₂ (dióxido de carbono) equivalente, funcionando como uma fonte adicional de receita associada ao desempenho ambiental do projeto. Embora sua participação direta na composição do LCOH ainda seja relativamente limitada em cenários iniciais, sua relevância estratégica está associada à mitigação de riscos regulatórios e à atração de capital voltado a ativos de baixa emissão (Castro *et al.*, 2023).

Ferramentas baseadas em Análise de Ciclo de Vida (ACV), como a Renovacalc, permitem quantificar essas externalidades ambientais e traduzi-las em benefícios econômicos, reforçando a integração entre desempenho ambiental e viabilidade financeira (Matsuura *et al.*, 2018). De forma geral, conclui-se que a competitividade do hidrogênio verde depende da combinação entre redução de custos tecnológicos, ganhos de escala e manutenção de mecanismos de incentivo capazes de sustentar a transição até a paridade com combustíveis fósseis (Aditiya *et al.*, 2026).

CONCLUSÃO

A análise realizada evidenciou que a tecnologia de eletrólise por PEM apresenta elevado potencial para contribuir com a transição energética e a produção sustentável de hidrogênio verde. Os resultados demonstraram que suas características operacionais, como elevada flexibilidade, maior compactação dos sistemas e integração eficiente com fontes renováveis intermitentes, constituem fatores importantes para sua aplicação em cenários de descarbonização.

Apesar dos avanços observados, foram identificados desafios relevantes relacionados à escalabilidade e à sustentabilidade da tecnologia. A dependência de metais nobres, como irídio e platina, permanece como um dos principais obstáculos técnicos e econômicos, enquanto a necessidade de água de elevada pureza representa um fator adicional que influencia a confiabilidade e a durabilidade dos sistemas.

No contexto brasileiro, verificou-se a existência de condições favoráveis ao desenvolvimento do hidrogênio verde, sustentadas por uma matriz energética renovável e por avanços regulatórios recentes capazes de ampliar a competitividade do setor. Dessa forma, concluiu-se que o avanço da tecnologia PEM dependerá principalmente da redução de custos, do desenvolvimento de materiais alternativos e do fortalecimento da pesquisa aplicada, permitindo consolidar o hidrogênio verde como elemento estratégico para a descarbonização e o desenvolvimento industrial sustentável.

REFERÊNCIAS

- ABDELGHANY, Muhammad Bakr et al. Hydrogen energy systems for decarbonizing smart cities and industrial applications: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 226, 116370, 2026.
- ABDIN, Z. et al. Hydrogen as an energy vector. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 120, 109620, 2019.
- ADITIYA, H. B. et al. Green hydrogen production technologies and scaling prospective. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 226, 116444, 2026.
- AZEVEDO, J. H. P. et al. **Análise Integrada de Ciclo de Vida e Avaliação Técnico-Econômica**. Rio de Janeiro: PUC-Rio, 2023.
- BRANNSTROM, Christian et al. Sustainability challenges of green hydrogen in Brazil. **Progress in Economic Geography**, v. 4, 100058, 2026.
- CASTRO, Nivalde de et al. **A economia do hidrogênio: transição, descarbonização e**

oportunidades para o Brasil. Rio de Janeiro: E-papers, 2023.

GAGLIARDI, G. G.; VENTURINI, P. Levelized Cost of Hydrogen (LCOH). **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 235, 155100, 2026.

HAMICHE, Ait Mimoune et al. Advances in steam electrolysis for green hydrogen production: Current status and future outlook. **Fuel**, v. 395, 135165, 2025.

IRENA. **Hydrogen: A renewable energy perspective**. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency, 2019.

LIN, K. et al. Shifting from fossil fuel-based to renewable water electrolysis: A perspective and outlook. **Applied Energy**, v. 401, 126661, 2025.

SOUZA FILHO, Hélio Nunes de et al. Low-carbon hydrogen carriers and derivatives: Multicriteria prioritization of routes for Brazil. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 249, 156019, 2026.

VALENTI, G. Hydrogen production, separation and purification for energy. London: **IET**, 2023.

ZHUANG, Y. et al. Environmental impact and system boundaries in hydrogen production. **Energy Conversion and Management: X**, v. 29, 101429, 2026.