



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

PRISCILLA CORREA RAMOS

TECNOLOGIAS ELETROQUÍMICAS PARA TRATAMENTO DE EFLUENTES
COM RECUPERAÇÃO DE HIDROGÊNIO: LEVANTAMENTO E ANÁLISE DE
MODELO DE NEGÓCIOS NO BRASIL E NO MUNDO.

CURITIBA

2026

PRISCILLA CORREA RAMOS

TECNOLOGIAS ELETROQUÍMICAS PARA TRATAMENTO DE EFLUENTES
COM RECUPERAÇÃO DE HIDROGÊNIO: LEVANTAMENTO E ANÁLISE DE
MODELOS DE NEGÓCIOS NO BRASIL E NO MUNDO.

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Pós-Graduação em MBA em Gestão Estratégica em Energias Naturais Renováveis, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Especialista em Gestão Estratégica em Energias Naturais Renováveis.

Orientador: Prof. Dr. Mauricio Romani

CURITIBA

2026

RESUMO

Este trabalho analisou a integração entre tecnologias eletroquímicas de tratamento de efluentes e a produção de hidrogênio como estratégia alinhada à transição energética e à economia circular. A partir de revisão bibliográfica e análise SWOT de modelos de negócios nacionais e internacionais, constatou-se que métodos como eletrocoagulação, eletro-oxidação e sistemas bioeletroquímicos apresentam elevado potencial para reduzir impactos ambientais, recuperar recursos e viabilizar a produção de hidrogênio de baixo carbono. A avaliação de empresas internacionais destacou oportunidades relevantes associadas à descarbonização, à valorização de efluentes e à geração de novos fluxos de receita, embora persistam desafios relacionados à escalabilidade, custos, maturidade tecnológica e marcos regulatórios. No contexto brasileiro, observou-se a ausência de soluções comerciais consolidadas, com iniciativas concentradas em pesquisa e desenvolvimento, o que revela tanto uma lacuna de mercado quanto uma oportunidade estratégica para inovação, investimentos e posicionamento do país no futuro mercado de hidrogênio sustentável associado ao saneamento e à gestão de efluentes.

Palavras-chave: Hidrogênio de baixo carbono, Tecnologias eletroquímicas, Tratamento de efluentes, Economia circular, Transição energética

ABSTRACT

This study analyzed the integration between electrochemical wastewater treatment technologies and hydrogen production as a strategy aligned with the energy transition and the circular economy. Based on a literature review and a SWOT analysis of national and international business models, it was found that methods such as electrocoagulation, electro-oxidation, and bioelectrochemical systems show high potential to reduce environmental impacts, recover resources, and enable the production of low-carbon hydrogen. The assessment of international companies highlighted relevant opportunities associated with decarbonization, wastewater valorization, and the generation of new revenue streams, although challenges related to scalability, costs, technological maturity, and regulatory frameworks persist. In the Brazilian context, the absence of consolidated commercial solutions was observed, with initiatives mainly concentrated in research and development, which reveals both a market gap and a strategic opportunity for innovation, investment, and the positioning of the country in the future market for sustainable hydrogen associated with sanitation and wastewater management.

Keywords: Low-carbon hydrogen, Electrochemical technologies, Wastewater treatment, Circular economy, Energy transition

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	6
2. OBJETIVOS	9
2.1 OBJETIVO GERAL	9
2.2 OBJETIVO ESPECÍFICO	9
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	10
3.1 Fontes de produção de hidrogênio	10
3.2 Hidrogênio Verde	10
3.3 Métodos eletroquímicos no tratamento de efluentes	11
3.3.1 Eletrocoagulação	11
3.3.2 Eletro-oxidação	12
3.3.3 Eletroflotação	13
3.4 Mercado mundial para hidrogênio	14
3.5 Mercado brasileiro para hidrogênio	14
4. METODOLOGIA	16
5. RESULTADOS	17
6. DISCUSSÃO	20
7. CONCLUSÃO	21
8. REFERENCIAS	22

1. INTRODUÇÃO

A transição energética tem se consolidado como um processo fundamental para o enfrentamento da crise climática global, ao propor a substituição gradual de fontes fósseis por fontes renováveis e mais limpas. Essa reconfiguração das matrizes energéticas busca não apenas a redução das emissões de gases de efeito estufa, mas também a promoção da segurança energética e do desenvolvimento sustentável. De acordo com a Agência Internacional de Energias Renováveis, a aceleração dessa transição é indispensável para limitar o aquecimento global a 1,5 °C, sendo necessário triplicar a capacidade global de geração renovável até 2030 e intensificar a eletrificação dos setores econômicos (IRENA, 2023).

No contexto brasileiro, embora a matriz energética já seja majoritariamente composta por fontes renováveis, como a hidroeletricidade, o país enfrenta o desafio de aprofundar a descarbonização em setores como o industrial e o de transportes (CEBRI et al., 2023). Dessa forma, políticas públicas integradas, investimentos em inovação e compromissos multilaterais são essenciais para consolidar a transição energética como vetor da descarbonização nacional.

No ano de 2024, o setor de transportes ficou em terceiro lugar no ranking de emissão dos gases de efeito estufa, sendo o de transporte de passageiros com maior emissão (SEEG, 2024). Diversas tecnologias estão sendo desenvolvidas para diminuir a emissão em 70% até 2050, como eletrificação, utilização de biocombustíveis e hidrogênio (MMA, 2025).

O hidrogênio ganhou destaque devido a sua transformação em substâncias utilizadas em diversos setores. No setor energético, há pesquisas na utilização de hidrogênio como combustível no transporte de passageiros, no entanto, apesar de seu potencial transformador, a adoção em larga escala de hidrogênio de baixa emissão de carbono enfrenta barreiras como custos elevados de produção, infraestrutura incompleta e lacunas no apoio político.

A produção de hidrogênio pode ocorrer por meio de diferentes rotas tecnológicas, incluindo a eletrólise da água utilizando fontes renováveis e a

obtenção a partir de combustíveis fósseis como gás natural e carvão; entretanto, globalmente a produção de hidrogênio ainda é predominantemente dependente de fontes fósseis, com cerca de 95% do hidrogênio sendo produzido por meio de processos ligados as fontes fósseis, gerando significativas emissões de gás carbônico quando comparado às rotas renováveis (REN21, 2023). Essa dependência de combustíveis fósseis, com a reforma a vapor do gás natural como principal método utilizado, ressalta a necessidade de transição para rotas de baixo carbono, tais como a eletrólise alimentada por energia solar ou eólica, que ainda representam uma parcela pequena do total produzido, mas com perspectivas de expansão frente às metas de descarbonização energética (REN21, 2023)

O Marco Legal do Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono, instituído pela Lei nº 14.948/2024, define o hidrogênio de baixa emissão de carbono como aquele combustível ou insumo industrial cuja emissão de gases de efeito estufa, conforme análise do ciclo de vida, seja menor ou igual a 7 kg de CO₂ equivalente por kg de H₂ produzido, estabelecendo esse limite como critério fundamental para sua caracterização (BRASIL, 2024). No mesmo diploma legal, o hidrogênio renovável é conceituado como o hidrogênio de baixa emissão de carbono que é coletado na natureza ou obtido a partir de fontes renováveis como biocombustíveis ou pela eletrólise alimentada por energia oriunda de fontes renováveis (solar, eólica, hidráulica, biomassa etc.), ampliando o escopo de rotas de produção sustentáveis reconhecidas formalmente (BRASIL, 2024). Por fim, o hidrogênio verde é definido especificamente como aquele produzido por meio da eletrólise da água alimentada exclusivamente por fontes de energia renováveis, destacando-se dentro das categorias legais por sua associação direta com fontes limpas e pela ausência de emissões de carbono no processo de produção (BRASIL, 2024).

A busca por soluções sustentáveis para a matriz energética global tem impulsionado o desenvolvimento de tecnologias voltadas à produção de hidrogênio, com destaque para os sistemas de eletrólise da água. Entre essas tecnologias, a eletrólise alcalina (AEL), a de membrana de troca de prótons (PEM), a de membrana de troca aniônica (AEM) e a eletrólise de óxido sólido (SOEC) apresentam diferentes níveis de maturidade tecnológica, custo,

eficiência e aplicabilidade industrial. Segundo relatório da International Renewable Energy Agency (IRENA, 2023), a comparação técnica e econômica entre essas opções é essencial para orientar políticas públicas, investimentos e estratégias industriais, pois cada uma apresenta vantagens e limitações que devem ser consideradas de acordo com o contexto energético e os recursos disponíveis.

Além dos aspectos técnicos, fatores como escalabilidade, durabilidade dos componentes e uso de materiais críticos também influenciam a viabilidade dessas tecnologias.

A utilização de efluentes ou águas residuárias como matéria-prima na produção de hidrogênio surge como uma alternativa promissora para contornar as limitações impostas pela escassez de recursos hídricos, já que permite aproveitar uma fração de água que seria descartada, reduzindo a necessidade de água potável tratada no processo de eletrólise convencional e agregando valor ao tratamento de efluentes (Robin et al., 2025; Pinto et al., 2025). Pesquisas recentes demonstram que a eletrólise de águas residuais pode alcançar elevados rendimentos de hidrogênio enquanto reduz substancialmente a demanda por água de alta pureza, possibilitando a geração de energia limpa em áreas com restrições de abastecimento hídrico (Robin et al., 2025). Essa abordagem não só contribui para a conservação dos recursos hídricos, ao reutilizar um recurso que seria descartado, como também auxilia no tratamento dos próprios efluentes, promovendo uma integração entre gestão da água e produção sustentável de hidrogênio alinhada à transição energética (Pinto et al., 2025).

A eletrólise da água é um método promissor na produção de hidrogênio pois não emite gases do efeito estufa, porém ela enfrenta desafios de eficiência e custo. Uma alternativa para superar esses desafios é utilizar efluente como fonte de matéria prima. Esta tecnologia seria híbrida, pois além de produzir hidrogênio, auxilia no tratamento do efluente (Klaime e Wiecheteck, 2023).

Nesse sentido, este trabalho visa analisar modelos de negócios no Brasil e no mundo de tratamento de efluentes através tecnologias eletroquímicas pelos quais seria possível a recuperação de hidrogênio.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Analisar modelos de negócios no Brasil e no mundo de tratamento de efluentes através tecnologias eletroquímicas com potencial para recuperação de hidrogênio.

2.2 OBJETIVO ESPECÍFICO

- Levantar, em nível nacional e internacional, tecnologias eletroquímicas que podem ser aplicadas ao tratamento de efluentes, onde o hidrogênio poderia ser aproveitado.
- Aplicar a análise SWOT em cada modelo de negócio para analisar suas forças e fraquezas, oportunidades e ameaças.
- Avaliar a viabilidade técnica, econômica e ambiental desses modelos de negócios, considerando eficiência energética, escalabilidade e contribuição para a economia circular.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Fontes de produção de hidrogênio

As fontes de obtenção de hidrogênio podem ser agrupadas conforme a origem da matéria-prima, incluindo fontes fósseis, renováveis e naturais, cada uma com diferentes níveis de maturidade tecnológica e impacto ambiental. As rotas fósseis, baseadas principalmente no gás natural, carvão mineral e derivados de petróleo, destacam-se pela elevada eficiência e ampla aplicação industrial, podendo ter suas emissões reduzidas com a adoção de sistemas de captura, uso e armazenamento de carbono. As fontes renováveis abrangem a biomassa, o biogás, os biocombustíveis e a água, sendo esta última utilizada na eletrólise quando associada a matrizes elétricas de baixa emissão, além do hidrogênio natural ou geológico e de rotas biológicas e termoquímicas avançadas, que, embora ainda emergentes, ampliam as perspectivas para a produção sustentável de hidrogênio no longo prazo (EPE, 2025a; EPE, 2025b; EPE e ItaipuParquetec, 2025).

3.2 Hidrogênio Verde

O hidrogênio verde é produzido por eletrólise da água utilizando apenas energia proveniente de fontes renováveis, sem emissão de CO₂ durante o processo, posicionando-se como vetor energético sustentável e promissor no contexto da descarbonização global. Essa definição aparece com destaque na dissertação de Thomsen (2023), que examina os obstáculos e viabilizadores para o desenvolvimento de uma economia de hidrogênio verde no Brasil, ressaltando sua natureza “zero carbono” e sua capacidade de integrar sistemas energéticos alinhados às metas climáticas internacionais

A relevância do hidrogênio verde é especialmente expressiva nos setores industriais pesados, onde alternativas como eletrificação direta são limitadas. Na dissertação de Emerik (2023), o uso da eletrólise alcalina conectada à matriz elétrica brasileira (com mais de 80 % de renováveis) demonstrou viabilidade

técnica e econômica: custos nivelados entre US\$ 1,26 e 1,64/kg, payback inferior a quatro anos e mitigação de até 131 mil toneladas de CO₂ em 20 anos. Além dos aspectos técnicos, a legitimação social e territorial do hidrogênio verde é determinante para seu desenvolvimento.

3.3 Métodos eletroquímicos no tratamento de efluentes

O tratamento de efluentes por métodos eletroquímicos tem se destacado como uma alternativa sustentável e eficiente frente aos processos convencionais de tratamento, especialmente em cenários industriais com altos níveis de contaminantes orgânicos e inorgânicos. Tecnologias como eletrocoagulação, eletro-oxidação e eletroflotação utilizam corrente elétrica aplicada através de eletrodos para gerar reações redox que promovem a remoção de poluentes, agregação de partículas e degradação de compostos persistentes, sem a necessidade de adição de grandes volumes de reagentes químicos externos. Em sistemas de eletrocoagulação, por exemplo, íons metálicos dissolvidos dos eletrodos atuam como coagulantes *in situ*, favorecendo a remoção de sólidos suspensos, óleos, corantes e metais pesados com elevada eficiência e menor produção de resíduos secundários em comparação com tratamentos químicos tradicionais. Já a eletro-oxidação direta e os processos avançados de oxidação eletroquímica geram radicais altamente reativos, que degradam moléculas orgânicas refratárias, promovendo a mineralização efetiva de contaminantes difíceis de degradar biologicamente (Avelino de Queiroz et al., 2024; Mao; Zhao; Cotterill, 2023; Suruuri et al., 2025).

3.3.1 Eletrocoagulação

A eletrocoagulação consiste na aplicação de uma corrente elétrica em um reator com eletrodos consumíveis, geralmente de ferro ou alumínio, que liberam íons metálicos capazes de promover a coagulação e floculação de contaminantes presentes nos efluentes, eliminando sólidos suspensos, matéria orgânica, metais pesados e outros poluentes sem a necessidade de grandes volumes de

reagentes químicos externos, o que reduz a geração de resíduos secundários e o impacto ambiental do processo. Do ponto de vista econômico, apesar de exigir investimento inicial em reatores eletroquímicos e consumo energético contínuo, a tecnologia pode ser competitiva quando otimizada, especialmente se integrada a soluções energéticas renováveis, reduzindo custos operacionais e permitindo tratamento eficiente em indústrias de médio e grande porte com menores custos de gestão de lodo e químicos em comparação com métodos convencionais. Sob a perspectiva industrial, sua modularidade permite aplicação em diversas escalas, sendo adaptável a diferentes tipos de efluentes e podendo ser dimensionada para operações contínuas ou modulares em linhas de produção, o que facilita sua adoção em setores regulados por normas ambientais rigorosas. No âmbito político e regulatório, a eletrocoagulação é alinhada a políticas de sustentabilidade e de redução de impactos hídricos, pois predispõe o reúso de água após tratamento eficiente, atende exigências de lançamento de efluentes e contribui para metas ambientais setoriais, além de ser uma tecnologia compatível com diretrizes de economia circular e práticas de redução de cargas poluentes em corpos d'água. (Avelino de Queiroz et al., 2024)

3.3.2 Eletro-oxidação

A eletro-oxidação é um processo de tratamento eletroquímico de efluentes em que os poluentes orgânicos e inorgânicos são degradados por espécies oxidantes geradas na superfície de eletrodos durante a aplicação de corrente elétrica, permitindo a mineralização de compostos refratários que não são removidos por métodos convencionais, e tem se mostrado eficaz na desinfecção e redução substancial de demanda orgânica em efluentes industriais e sanitários (electro-oxidation ou anodic oxidation). Do ponto de vista econômico, a tecnologia enfrenta custos de capital relativamente elevados devido ao investimento inicial em eletrodos especializados, sistemas de potência e infraestrutura de reatores, bem como considerável consumo energético durante a operação, fatores que podem ser compensados por ganhos em eficiência de remoção e pela redução na necessidade de etapas adicionais de tratamento (Emergen Research, s.d.). Na aplicação em grande escala, estudos piloto

indicam que a eletro-oxidação pode ser dimensionada para operações contínuas em instalações industriais, sobretudo quando integrada a fontes de energia renovável e quando o projeto do reator e materiais de eletrodo são otimizados para reduzir consumo de energia e manutenção, favorecendo sua adoção em setores com exigências rigorosas de qualidade do efluente. Sob a perspectiva política e ambiental, a tecnologia está alinhada com políticas de sustentabilidade hídrica e de reuso de água, pois promove alta eficiência na remoção de contaminantes emergentes e redução de carga poluente lançada em corpos hídricos, contribuindo para metas de proteção ambiental e de economia circular, embora dependa de marcos regulatórios que incentivem inovações tecnológicas e o uso de energias limpas para mitigar impactos associados ao consumo energético (Emergen Research, s.d.; Xu, 2025)

3.3.3 Eletroflotação

A eletroflotação é uma técnica de tratamento eletroquímico de efluentes que se baseia na geração de microbolhas de gás por eletrólise, capazes de elevar sólidos suspensos, colóides e contaminantes à superfície, onde podem ser removidos de forma eficiente, o que a torna particularmente eficaz na remoção de óleos, graxas, partículas finas e metais pesados de águas residuais industriais. Sob a ótica econômica, embora a eletroflotação exija um investimento inicial relativamente mais elevado em sistemas de eletrólise e eletrodos, essa tecnologia pode reduzir custos operacionais ao diminuir a necessidade de reagentes químicos e permitir a recuperação de compostos valiosos presentes no efluente, bem como ao reduzir o volume de resíduos a ser descartado. Em termos de aplicação em grande escala, estudos recentes demonstram que a eletroflotação pode ser dimensionada para uso contínuo em indústrias de grande porte, especialmente quando integrada a outras etapas de tratamento como adsorção ou pré-tratamento físico-químico, o que favorece sua adoção em cadeias produtivas com altos requisitos de qualidade de efluentes. Politicamente, a tecnologia está alinhada com diretrizes ambientais voltadas à redução da carga poluente e ao reuso da água, podendo apoiar regulamentações que exigem tratamento mais rigoroso antes do lançamento em

corpos hídricos, enquanto do ponto de vista ambiental a eletroflotação contribui para a diminuição de impactos ao meio ambiente ao melhorar a remoção de contaminantes e facilitar o reúso de água tratada, embora sua eficiência dependa de parâmetros operacionais como pH e presença de eletrólitos, o que demanda políticas públicas de incentivo à pesquisa e ao desenvolvimento tecnológico. (Aung et al., 2025; Mattos et al., 2024)

3.4 Mercado mundial para hidrogênio

O mercado mundial de hidrogênio enfrenta desafios relevantes para a consolidação da produção de baixo carbono, sobretudo em função dos altos custos associados à eletrólise com fontes renováveis, da competitividade do hidrogênio fóssil sem captura de carbono, das incertezas regulatórias e das limitações de infraestrutura, fatores que têm provocado atrasos e cancelamentos de projetos. Ainda assim, as projeções até 2030 indicam crescimento contínuo, com expansão significativa da capacidade instalada e em construção, apesar da revisão para baixo das estimativas mais otimistas de produção. A demanda global permanece elevada, especialmente em setores industriais tradicionais, e espera-se que o hidrogênio de baixas emissões amplie gradualmente sua participação no mix energético. Para que esse potencial se concretize, são necessários avanços em políticas públicas, financiamento, redução de custos tecnológicos, expansão da infraestrutura e harmonização regulatória internacional, por meio de esforços coordenados entre governos, indústria e instituições financeiras (IEA, 2025; HYDROGEN COUNCIL, 2025).

3.5 Mercado brasileiro para hidrogênio

O mercado brasileiro de produção de hidrogênio apresenta elevado potencial técnico, mas ainda enfrenta desafios institucionais, econômicos e estruturais, como a necessidade de um arcabouço regulatório claro, políticas de incentivo à produção de hidrogênio de baixo carbono, altos custos iniciais, lacunas de infraestrutura e incertezas que afetam a atratividade para

investidores. Apesar dessas limitações, as projeções indicam crescimento significativo até 2030, impulsionado pela matriz energética renovável e por políticas públicas como o Programa Nacional do Hidrogênio e o marco legal do setor, com estimativas de produção anual entre 200 e 800 mil toneladas de hidrogênio de baixo carbono. Para viabilizar esse cenário, tornam-se essenciais ações coordenadas que envolvam aceleração regulatória, incentivos fiscais, mecanismos de financiamento, fortalecimento da capacidade tecnológica, formação de mão de obra especializada e ampliação de parcerias público-privadas, de modo a consolidar o Brasil como um ator competitivo no mercado global de hidrogênio de baixa emissão de carbono (Siffert e Rocha, 2025; IPEA, 2025; MME, 2025).

4. METODOLOGIA

Foi realizada uma revisão bibliográfica utilizando o site google acadêmico e google para buscar modelos de negócios de tratamento de efluentes utilizando método eletroquímico recuperando hidrogênio no Brasil e no mundo, e aplicado a análise SWOT para identificar, pontos fortes, fracos, fraquezas e oportunidades dos modelos de negócios encontrados, para assim entender o cenário global sobre o tema.

Foram utilizadas as seguintes palavras chaves:

“hidrogênio, tratamento de efluentes”, “empresas internacionais hidrogênio, tratamento de efluentes”, “desafios, empresas internacionais hidrogênio, tratamento de efluentes”, “vantagens, empresas internacionais, tratamento de efluentes”, “desvantagens, empresas internacionais, tratamento de efluentes”.

Foram realizadas buscas no idioma inglês utilizando as mesmas palavras do idioma português:

“hydrogen, wastewater treatment”, “international companies hydrogen, wastewater treatment”, “challenges, international companies, hydrogen, wastewater treatment”, “advantages, international companies, wastewater treatment”, “disadvantages, international companies, wastewater treatment”.

5. RESULTADOS

Com a aplicação da metodologia descrita na sessão anterior, foram obtidos os resultados a seguir.

Purammon Ltd. - Empresa com tecnologia eletroquímica que trata águas residuais enquanto produz hidrogênio “verde” através do eletrolisador W2toH2, usando efluentes em vez de água potável como insumo, reduzindo custos de tratamento e pegada de carbono e possibilitando hidrogênio de baixo custo e menor impacto ambiental.

Análise SWOT:

- **Forças:** Tecnologia pioneira que combina tratamento de efluentes com produção de hidrogênio com menor consumo de energia e sem usar água potável; modularidade e instalação local favorecem adoção industrial; redução de custos operacionais para clientes industriais.
- **Fraquezas:** Tecnologia ainda emergente, exigindo maior validação em larga escala e certificações; dependência de desenvolvimento contínuo de eletrocatalisadores e integração de sistemas.
- **Oportunidades:** Crescimento da demanda global por soluções de hidrogênio sustentável e tratamento circular de efluentes; incentivos para tecnologias de economia circular e políticas climáticas podem impulsionar investimentos; potencial para parcerias com grandes indústrias geradoras de efluentes.
- **Ameaças:** Competição com tecnologias consolidadas de tratamento de água e hidrogênio; riscos associados à escalabilidade e custos de energia elétrica para operação; barreiras regulatórias em mercados mais rígidos.

WATR-H2 / Current Water Technologies - Joint venture que desenvolve o sistema AmmEL-H2, capaz de remover amônia de águas residuais por processo eletroquímico ao mesmo tempo em que produz hidrogênio de alta pureza como subproduto, com mais de 99 % de captura, e transforma estações de tratamento em ativos lucrativos.

Análise SWOT:

- Forças: Sistema comprovado com patente pendente e capacidade de produzir hidrogênio de alta pureza diretamente de efluentes com amônia; potencial de transformar estações urbanas e industriais em centros energéticos locais; tecnologia baseada em tratamento e recuperação simultâneos.
- Fraquezas: Tecnologia dependente de concentração adequada de amônia nos efluentes; alto custo inicial de implementação em larga escala e necessidade de adaptação de plantas existentes.
- Oportunidades: Expansão global de infraestrutura de hidrogênio de baixo carbono; crescente demanda por soluções que combinem gestão de nutrientes e produção de energia; incentivos governamentais em muitos países para tecnologias verdes e economia circular.
- Ameaças: Necessidade de aceitação regulatória em múltiplos mercados; competição com soluções biológicas e químicas tradicionais de remoção de nitratos/amônia sem produção de energia; volatilidade de preços de energia elétrica que afeta custos operacionais.

Aquature - Empresa que aplica sistemas bio-eletrquímicos capazes de tratar efluentes industriais ao mesmo tempo em que recupera produtos valiosos, incluindo hidrogênio, caústico e carbono capturado, transformando custos de operação em receitas recorrentes e reduzindo consumo de energia e químicos ao mesmo tempo.

Análise SWOT:

- Forças: Abordagem integrada de tratamento e recuperação de recursos com tecnologia BASE (bio-assisted electrolysis), reduzindo custos e impacto ambiental; pode gerar múltiplos produtos de valor agregado além de hidrogênio.
- Fraquezas: Complexidade técnica da integração bio-eletrquímica pode demandar mais tempo para otimização e confiabilidade operacional em grande escala; necessidade de expertise para operação e manutenção.
- Oportunidades: Mercado crescente por soluções que transformem operações em economias circulares com recuperação de energia e produtos químicos; potencial para contratos com grandes indústrias e indústrias de processo intensivo em água.
- Ameaças: Competição com tecnologias mais estabelecidas de tratamento de efluentes; incertezas regulatórias e barreiras à adoção de tecnologias híbridas em indústrias conservadoras; dependência da qualidade e composição do efluente.

No Brasil não foi encontrado empresas comerciais estabelecidas que integrem tratamento eletrquímico de efluentes com recuperação de hidrogênio como produto final. As iniciativas identificadas são majoritariamente laboratoriais e de P&D, focadas em tecnologia aplicada e com potencial para gerar soluções comerciais no futuro.

6. DISCUSSÃO

A análise das empresas Purammon Ltd., WATR-H2/Current Water Technologies e Aquature evidencia o potencial das tecnologias eletroquímicas aplicadas ao tratamento de efluentes com recuperação de hidrogênio como uma fronteira inovadora na integração entre saneamento, energia e economia circular. Essas soluções alinham-se fortemente aos princípios da sustentabilidade ao possibilitarem a mitigação de impactos ambientais associada à geração de hidrogênio de baixo carbono, transformando estações de tratamento tradicionalmente vistas como centros de custo em ativos estratégicos geradores de valor econômico, energético e ambiental.

Entretanto, trata-se de um campo ainda emergente, com limitações relacionadas à escalabilidade, à maturidade tecnológica e à necessidade de validação operacional em larga escala, além da dependência das características dos efluentes e dos elevados custos iniciais. Apesar disso, o avanço de políticas climáticas, metas de descarbonização e incentivos à economia circular cria um ambiente favorável à expansão dessas tecnologias. No contexto brasileiro, a ausência de soluções comerciais consolidadas indica uma fase pré-comercial, mas também revela uma oportunidade estratégica para o desenvolvimento tecnológico, inovação industrial e atração de investimentos, especialmente diante da elevada participação de fontes renováveis na matriz energética nacional.

7. CONCLUSÃO

A análise das experiências internacionais demonstra que o tratamento de efluentes por métodos eletroquímicos com recuperação de hidrogênio possui elevado potencial estratégico, ambiental e econômico, especialmente quando inserido em modelos de economia circular. As empresas analisadas apresentam soluções tecnológicas capazes de reduzir impactos ambientais, otimizar o uso de recursos hídricos e gerar hidrogênio de baixo carbono, contribuindo para a transição energética e para a sustentabilidade dos sistemas de saneamento e industriais.

Apesar dos avanços, os resultados indicam que a consolidação dessas tecnologias depende do amadurecimento técnico, da redução de custos, da superação de barreiras regulatórias e da validação em escala industrial. A competitividade frente a tecnologias convencionais e a dependência de condições específicas dos efluentes reforçam a necessidade de políticas públicas de incentivo, mecanismos de financiamento e estratégias de integração com cadeias produtivas já existentes.

No Brasil, a inexistência de empresas comerciais nesse segmento revela um campo promissor para inovação e desenvolvimento tecnológico. O fortalecimento da interação entre universidades, centros de pesquisa, startups e grandes indústrias pode viabilizar a transição das soluções hoje restritas ao ambiente de P&D para aplicações comerciais. Assim, o país tem a oportunidade de se posicionar estrategicamente no futuro mercado de hidrogênio de baixo carbono associado ao saneamento e à gestão de efluentes, desde que haja alinhamento entre política industrial, regulação ambiental e investimentos em inovação.

8. REFERENCIAS

AQUATURE. Circular wastewater solutions & clean fuel production – BASE microbial electrolysis systems. Reino Unido: Aquature, s.d. Disponível em: <https://aquature.co.uk/>. Acesso em: 27 jan. 2026.

AUNG, H. T.; KOLESNIKOV, A. V.; AVERINA, Yu. M.; CHELNOKOV, V. V.; CHYRAGOV, F. M. Effect of background electrolytes and pH on electroflotation efficiency for heavy metal removal. *UNEC Journal of Engineering and Applied Sciences*, v. 5, n. 1, p. 115–123, 2025. DOI: 10.61640/ujeas.2025.0512. Disponível em: <https://unec-jeas.com/articles/volume-5-no-1-2025/effect-of-background-electrolytes-and-ph-on-electroflotation-efficiency-for-heavy-metal-removal>. Acesso em: 24 jan. 2026.

AVELINO DE QUEIROZ, Ana Quézia; DA SILVA AGUIAR MACIEL, Gabriele; DE LIMA MELO, Bernardo; BARBOSA ALVES, Larissa; FONTES CAVALCANTE, Reinaldo. Análise de desempenho do uso de tecnologia eletrolítica no tratamento de efluentes domésticos: uma revisão sistemática da literatura. *Revista Semiárido De Visu*, v. 12, n. 3, p. 1559–1572, 2024. DOI: 10.31416/rsdv.v12i3.952. Disponível em: <https://semiaridodevisu.ifsertaope.edu.br/index.php/rsdv/article/view/952>. Acesso em: 24 jan. 2026.

BITTENCOURT, Sérgio Deitos. Eletrodiálise: uma tecnologia limpa para o tratamento de efluentes galvânicos. *Revista Meio Ambiente e Sustentabilidade*, v. 16, n. 8, p. —, 2025. DOI: 10.22292/mas.v16i8.827. Disponível em: <https://doi.org/10.22292/mas.v16i8.827>. Acesso em: 24 jan. 2026.

BRASIL. Lei nº 14.948, de 2 de agosto de 2024. Institui o marco legal do hidrogênio de baixa emissão de carbono; dispõe sobre a Política Nacional do Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono, seus princípios, objetivos, conceitos, governança e instrumentos, e institui incentivos para a indústria do hidrogênio de baixa emissão de carbono. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 2 ago. 2024. Disponível em: <https://www2.camara.leg.br/legin/fed/lei/2024/lei-14948-2-agosto-2024-796030-publicacaooriginal-172539-pl.html>. Acesso em: 31 jan. 2026.

CURRENT WATER TECHNOLOGIES INC. AmmEL-H2 hydrogen production and wastewater treatment system. Seattle, WA, EUA: Current Water Technologies Inc., s.d. Disponível em: <https://www.currentwatertechnologies.com/>. Acesso em: 27 jan. 2026.

CEBRI; EPE; BID; CENERGIA. *Neutralidade de carbono até 2050: cenários para uma transição eficiente no Brasil*. Relatório do Programa de Transição Energética – PTE, 13 fev. 2023. Disponível em: <https://www.cebri.org/br/doc/309/neutralidade-de-carbono-ate-2050-cenarios-para-uma-transicao-eficiente-no-brasil> (ou no relatório final disponível em PDF na plataforma do programa). Acesso em: 31 jan. 2026.

EMERGEN RESEARCH. Electro-Oxidation market restraints: custo energético e investimento de capital em sistemas de oxidação eletroquímica. Disponível em: <https://www.emergenresearch.com/pt/industry-report/electro-oxidation-market>. Acesso em: 24 jan. 2026.

EMERIK, Rômulo Carlos da Silva. Modelagem e simulação de um sistema de produção de hidrogênio a partir da eletrólise da água – uma abordagem com enfoque na descarbonização e transição da matriz energética atual. 2023. 97 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2023.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). Fact sheet – Panorama atual da produção e consumo de hidrogênio no Brasil. Rio de Janeiro: EPE, 2025. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/imprensa/noticias/epe-publica-fact-sheet-sobre-producao-e-consumo-de-hidrogenio-no-brasil>. Acesso em: 21 jan. 2026.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). Nota técnica – Hidrogênio e biomassa: oportunidades para produção e uso de hidrogênio em sistemas de bioenergia. Rio de Janeiro: EPE, 2025. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dadosabertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-891/NT-EPE-DPG-SDB-2025-02_H2%20e%20biomassa.pdf. Acesso em: 21 jan. 2026.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE); ITAIPU PARQUETEC. Roadmap tecnológico de hidrogênio: perspectivas tecnológicas, oportunidades de inovação e custos de produção de hidrogênio de diferentes intensidades de carbono no Brasil. Rio de Janeiro: EPE; Itaipu Parquetec, 2025. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-899/Roadmap%20H2%20-%20EPE-PTI%20-%20Tecnologia%20%28VF%29.pdf>. Acesso em: 21 jan. 2026.

KLAIME FILHO, Michel; WIECHETECK, Giovana Kátie. Produção de hidrogênio por eletrólise de água utilizando águas residuárias: uma revisão. *Revista de Engenharia e Tecnologia*, v. 15, n. 1, 15 dez. 2023. Disponível em: <https://revistas.uepg.br/index.php/ret/article/view/22240/209209218189>. Acesso em: 31 jan. 2026.

HYDROGEN COUNCIL; MCKINSEY & COMPANY. Global Hydrogen Compass: investimentos, projetos e tendências 2025. [S.l.]: Hydrogen Council; McKinsey & Co., 2025. Disponível em: <https://www.hydrogencouncil.com/en/hydrogen-compass/>. Acesso em: 24 jan. 2026.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). *Global Hydrogen Review 2025*. Paris: IEA, 2025. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2025>. Acesso em: 24 jan. 2026.

IPEA – INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA. O mercado do hidrogênio de baixo carbono no Brasil: perspectivas e desafios até 2030. Brasília: Ipea, 2025. Disponível em:

<https://repositorio.ipea.gov.br/handle/123456789/36350>. Acesso em: 24 jan. 2026.

IRENA – Agência Internacional de Energias Renováveis. *World Energy Transitions Outlook 2023: 1.5°C Pathway*. Abu Dhabi: IRENA, 2023. Disponível em: <https://www.irena.org/Publications/2023/Jun/World-Energy-Transitions-Outlook-2023>. Acesso em: 31 jan. 2026.

JING, G. et al. Electrocoagulation for industrial wastewater treatment: an updated review. *Environmental Science: Water Research & Technology*, v. 7, p. 1177–1196, 2021. DOI: 10.1039/D1EW00158B. Disponível em: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlepdf/2021/ew/d1ew00158b>. Acesso em: 24 jan. 2026.

MAO, Yi; ZHAO, Yaqian; COTTERILL, Sarah. Examining current and future applications of electrocoagulation in wastewater treatment. *Water*, v. 15, n. 8, p. 1455, 2023. DOI: 10.3390/w15081455. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/w15081455>. Acesso em: 24 jan. 2026.

MATTOS, Julio Cesar Pinho et al. Prospecção tecnológica sobre técnicas de eletroflotação e eletrocoagulação aplicadas no tratamento das águas residuárias das indústrias do ramo do látex. *Cadernos de Prospecção*, v. 9, n. 3, p. —, 2024. DOI: 10.9771/cp.v9i3.14141. Disponível em: <https://periodicos.ufba.br/index.php/nit/article/view/14141>. Acesso em: 24 jan. 2026.

MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA (MME). Programa Nacional de Hidrogênio – PNH2. Brasília: MME, 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/programa-nacional-do-hidrogenio-1>. Acesso em: 24 jan. 2026.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE E MUDANÇA DO CLIMA (MMA). Diretrizes Nacionais para Descarbonizar o Transporte Urbano de Carga. 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/mma/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/qualidade-ambiental-e-meio-ambiente-urbano/diretrizes-nacionais-para-descarbonizar-o-transporte-urbano-de-carga.pdf>. Acesso em: 01 jan. 2026.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME); EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). Plano Nacional de Energia 2050. Brasília: MME/EPE, 2020. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dadosabertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-227/topico-563/Relatorio%20Final%20do%20PNE%202050.pdf>. Acesso em: 21 jan. 2026.

PINTO, V. G. C. et al. Qualidade da água e reuso de efluentes na produção de hidrogênio verde: contribuições para a transição energética. *Revista de Geopolítica*, 2025. Disponível em: <https://revistageo.com.br/revista/article/view/1091>. Acesso em: 31 jan. 2026.

PRINCETON ENGINEERING. Dirty water boosts prospects for clean hydrogen. Princeton University, 28 out. 2025. Disponível em:

<https://engineering.princeton.edu/news/2025/10/28/dirty-water-boosts-prospects-clean-hydrogen>. Acesso em: 31 jan. 2026.

PURAMMON LTD. Green Technology – Wastewater to Green Hydrogen Electrolysis. Pardesia, IL: Purammon Ltd., s.d. Disponível em: <https://www.purammon.com/green-technology>. Acesso em: 27 jan. 2026.

REN21 – Renewable Energy Policy Network for the 21st Century. *Renewables 2023 Global Status Report: Market Developments – Hydrogen*. 2023. Disponível em: <https://www.ren21.net/>. Acesso em: 31 jan. 2026.

ROBIN, H. M. et al. A comprehensive analysis of hydrogen production through industrial effluents via dark fermentation and proton exchange membrane electrolysis. *ScienceDirect*, 2025. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772970225000264>. Acesso em: 31 jan. 2026.

SEEG – SISTEMA DE ESTIMATIVAS DE EMISSÕES E REMOÇÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA. *Análise das emissões brasileiras de gases de efeito estufa e suas implicações para as metas climáticas*. São Paulo: Observatório do Clima, 2024. Disponível em: <https://seeg.eco.br/>. Acesso em: 31 jan. 2026.

SIFFERT, Nelson; ROCHA, Kátia Maria Carlos. O mercado do hidrogênio de baixo carbono no Brasil: perspectivas e desafios até 2030. Texto para Discussão 3082. Brasília: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA), 2025. Disponível em: <https://repositorio.ipea.gov.br/handle/123456789/36350>. Acesso em: 24 jan. 2026.

SURUURI, M. et al. Recent progress on electrocoagulation process for wastewater treatment: A review. *Journal of Physics: Conference Series*, v. 2942, p. 012047, 2025. DOI: 10.1088/1742-6596/2942/1/012047. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2942/1/012047>. Acesso em: 24 jan. 2026.

THOMSEN, M. Desenvolvimento de uma economia de hidrogênio verde no Brasil: obstáculos e viabilizadores. (2023) Dissertação—FUNDAÇÃO GETULIO VARGAS ESCOLA BRASILEIRA DE ADMINISTRAÇÃO PÚBLICA E DE EMPRESAS MESTRADO EM GESTÃO EMPRESARIAL.

XU, Lingjie. Analysis of electrochemical technologies for wastewater treatment. *Theoretical and Natural Science*, v. 119, p. 57–62, 2025.