v7.n6.2026

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

VIABILIDADE ECONÔMICA E ESTRUTURAL DA IMPLANTAÇÃO DE UMA PLANTA DE HIDROGÊNIO VERDE NO MARANHÃO A PARTIR DO TRATAMENTO DE EFLUENTES AGROINDUSTRIAIS E INDUSTRIAIS

ECONOMIC AND STRUCTURAL FEASIBILITY OF IMPLEMENTING A GREEN HYDROGEN PLANT IN MARANHÃO BASED ON THE TREATMENT OF AGRO-INDUSTRIAL AND INDUSTRIAL EFFLUENTS

VIABILIDAD ECONÓMICA Y ESTRUCTURAL DE LA IMPLEMENTACIÓN DE UNA PLANTA DE HIDRÓGENO VERDE EN MARANHÃO BASADA EN EL TRATAMIENTO DE EFLUENTES AGROINDUSTRIALES E INDUSTRIALES

Emerson Daniel da Conceição Ferreira[1], Conrado Augustus de Melo[2]

e767980

https://doi.org/10.47820/recima21.v7i6.7980

PUBLICADO: 06/2026

RESUMO

O presente estudo analisou a viabilidade econômica, estrutural e ambiental da implantação de uma planta de produção de hidrogênio verde (H_2V) no Estado do Maranhão, utilizando efluentes agroindustriais e industriais como insumo principal para processos de eletrólise e tratamento de águas residuais. Trata-se de um estudo exploratório, de base documental e analítica, fundamentado predominantemente em dados secundários. Considerou-se o potencial energético do estado, a disponibilidade hídrica, a infraestrutura logística e as políticas públicas de incentivo à transição energética, incluindo programas estaduais como o Eosolar e o Atlas Solar e Eólico do Maranhão (SEINC, 2023; IMESC, 2023). Foram avaliados dados geográficos, energéticos e ambientais provenientes de fontes oficiais (IBGE, Embrapa, PNUD), bem como estudos técnicos nacionais sobre hidrogênio verde (EMBRAPA, 2023; EPE, 2023). Os resultados indicam que as regiões sul e leste do estado apresentam condições favoráveis para a instalação de unidades modulares de produção de H_2V, integradas a sistemas híbridos fotovoltaicos e eólicos. O aproveitamento de efluentes agroindustriais demonstra potencial para redução de custos com água potável, geração de empregos diretos e indiretos e mitigação de emissões de CO_2, reforçando o papel do Maranhão como polo estratégico de hidrogênio verde no Nordeste brasileiro. A pesquisa evidencia, ainda, a necessidade de desenvolvimento de marcos regulatórios e de fortalecimento de parcerias público-privadas, a fim de maximizar a eficiência e a sustentabilidade da cadeia produtiva.

PALAVRAS-CHAVE: Hidrogênio verde. Viabilidade econômica. Efluentes agroindustriais. Maranhão. Sustentabilidade energética.

ABSTRACT

This study analyzes the economic, structural, and environmental feasibility of implementing a green hydrogen production plant in the state of Maranhão, Brazil, using agro-industrial and industrial effluents as the main input for electrolysis and wastewater treatment processes. It is an exploratory study, based on documentary and analytical approaches, predominantly supported by secondary data. The analysis considers the state's energy potential, water availability, logistical infrastructure, and public policies aimed at promoting the energy transition, including state programs such as Eosolar and the Solar and Wind Atlas of Maranhão (SEINC, 2023; IMESC, 2023).

[1] UFABC, mestre.
[2] UFABC, doutor.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Geographic, energy, and environmental data from official sources (IBGE, Embrapa, UNDP) were evaluated, along with national technical studies on green hydrogen (EMBRAPA, 2023; EPE, 2023). The results indicate that the southern and eastern regions of the state present favorable conditions for the installation of modular green hydrogen (GH_2) production units, integrated with hybrid photovoltaic and wind energy systems. The use of agro-industrial effluents shows potential to reduce potable water costs, generate direct and indirect employment, and mitigate CO_2 emissions, reinforcing Maranhão's role as a strategic hub for green hydrogen in northeastern Brazil. The study also highlights the need for the development of regulatory frameworks and the strengthening of public–private partnerships to maximize the efficiency and sustainability of the production chain.

KEYWORDS: *Green hydrogen. Economic feasibility. Agro-industrial effluents. Maranhão; Energy sustainability.*

RESUMEN
El presente estudio analizó la viabilidad económica, estructural y ambiental de la implementación de una planta de producción de hidrógeno verde (H_2V) en el Estado de Maranhão, utilizando efluentes agroindustriales e industriales como insumo principal para procesos de electrólisis y tratamiento de aguas residuales. Se trata de un estudio exploratorio, de carácter documental y analítico, fundamentado predominantemente en datos secundarios. Se consideraron el potencial energético del estado, la disponibilidad hídrica, la infraestructura logística y las políticas públicas de incentivo a la transición energética, incluyendo programas estatales como Eosolar y el Atlas Solar y Eólico de Maranhão (SEINC, 2023; IMESC, 2023). Se evaluaron datos geográficos, energéticos y ambientales procedentes de fuentes oficiales (IBGE, Embrapa, PNUD), así como estudios técnicos nacionales sobre hidrógeno verde (EMBRAPA, 2023; EPE, 2023). Los resultados indican que las regiones sur y este del estado presentan condiciones favorables para la instalación de unidades modulares de producción de H_2V, integradas a sistemas híbridos fotovoltaicos y eólicos. El aprovechamiento de efluentes agroindustriales demuestra potencial para reducir los costos asociados al uso de agua potable, generar empleos directos e indirectos y mitigar las emisiones de CO_2, reforzando el papel de Maranhão como polo estratégico de hidrógeno verde en el nordeste brasileño. La investigación evidencia, además, la necesidad de desarrollar marcos regulatorios y fortalecer las asociaciones público-privadas, con el fin de maximizar la eficiencia y la sostenibilidad de la cadena productiva.

PALABRAS CLAVE: *Hidrógeno verde. Viabilidad económica. Efluentes agroindustriales. Maranhão. Sostenibilidad energética.*

1. INTRODUÇÃO

A crescente demanda mundial por energia, associada à necessidade urgente de mitigação dos impactos das mudanças climáticas, tem impulsionado transformações estruturais nos sistemas produtivos e nas políticas energéticas em escala global. Nesse contexto, a transição energética consolida-se como uma estratégia central para países desenvolvidos e em desenvolvimento, sobretudo pela incorporação de fontes limpas e sustentáveis. Nesse contexto, o hidrogênio verde (H_2V) destaca-se como um vetor energético estratégico para a

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

descarbonização de setores intensivos em emissões, como a indústria pesada e o transporte de longa distância (Alvarenga, 2021; MCKINSEY, 2024; IPEA, 2024).

O hidrogênio verde é produzido, majoritariamente, por meio da eletrólise da água, processo no qual a dissociação do hidrogênio e do oxigênio ocorre a partir de corrente elétrica proveniente de fontes renováveis, como solar, eólica ou biomassa. Sob a perspectiva técnico-científica, esse processo resulta em um combustível de elevada densidade energética e ausência de emissões diretas de dióxido de carbono, configurando-se como alternativa potencial para o armazenamento de energia intermitente e para aplicações industriais, no setor de transportes e na geração elétrica (USP, 2024; ACCIONA, 2023). Estudos recentes indicam que o H_2V pode desempenhar papel relevante na consolidação da economia circular, especialmente quando integrado ao aproveitamento de resíduos e efluentes agroindustriais (SUSTENERE, 2024; EMBRAPA, 2023).

No Brasil, as condições estruturais para a produção de hidrogênio verde são consideradas favoráveis, em função da matriz elétrica majoritariamente renovável, com participação superior a 85%, além da ampla disponibilidade de recursos solares e eólicos. Esses fatores posicionam o país entre aqueles com significativa competitividade potencial na produção de H_2V a custos reduzidos (EPE, 2023; MME, 2023; MCKINSEY, 2024). No contexto nacional, o Nordeste brasileiro apresenta vantagens relativas associadas à abundância de recursos renováveis e à disponibilidade territorial para expansão de projetos energéticos.

Nesse contexto regional, o Maranhão apresenta características geográficas, climáticas e logísticas que podem favorecer a implantação de plantas de produção de hidrogênio verde, embora essa potencialidade ainda dependa de análises comparativas e validações mais aprofundadas. O estado registra índices de radiação solar superiores a 5,5 kWh/m²/dia e condições eólicas comparáveis a outros polos nordestinos, além de contar com infraestrutura logística relevante, como o Porto do Itaqui e o Corredor Norte de Exportação (IMESC, 2024; SEINC, 2024).

Adicionalmente, a utilização de efluentes agroindustriais e industriais como insumo indireto nos processos de produção de H_2V representa uma abordagem inovadora sob a perspectiva ambiental e tecnológica. A integração entre tratamento de efluentes e produção energética contribui para a redução da demanda por água potável e para a mitigação de impactos ambientais associados aos resíduos líquidos (EMBRAPA, 2023; REVISTA CONTRIBUCIONES A LAS CIENCIAS SOCIALES, 2024). No Maranhão, setores como o beneficiamento de soja, frigoríficos, laticínios e indústrias alimentícias geram volumes expressivos de efluentes com potencial de reaproveitamento, reforçando a pertinência dessa abordagem no contexto estadual.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Sob a ótica da sustentabilidade industrial e da economia circular, essa estratégia está alinhada a abordagens que integram produção energética, gestão de resíduos e inovação tecnológica (GESEC, 2023; IPEA, 2024). Nesse sentido, estados com maior diversificação agroindustrial podem apresentar condições mais favoráveis à adoção de modelos integrados, o que sugere uma possível vantagem relativa para o Maranhão.

Este estudo caracteriza-se como uma pesquisa exploratória, de base documental e analítica, fundamentada predominantemente em dados secundários provenientes de bases institucionais e estudos técnicos. Não contempla validação experimental, concentrando-se na análise de viabilidade a partir de informações disponíveis na literatura e em bancos de dados oficiais, em consonância com o delineamento metodológico apresentado no resumo e no abstract.

Dessa forma, a implantação de uma planta de hidrogênio verde no Maranhão, baseada no reaproveitamento de efluentes agroindustriais e industriais, configura-se como uma oportunidade potencial para conciliar eficiência energética, inovação tecnológica e mitigação de impactos ambientais. Essa abordagem pode contribuir para a redução de custos operacionais associados ao uso de água, geração de empregos diretos e indiretos e diminuição de emissões de CO_2, conforme indicado nos resultados do estudo.

O presente estudo tem como objetivo analisar a viabilidade econômica, estrutural e ambiental a partir da revisão da literatura para implantação de uma planta de hidrogênio verde no Maranhão, considerando: (i) as condições geográficas e climáticas do estado; (ii) a infraestrutura energética e logística disponível; (iii) o volume e a qualidade dos efluentes passíveis de aproveitamento; (iv) os custos e benefícios econômicos associados; e (v) as perspectivas de inserção do hidrogênio verde no mercado regional e nacional.

Adicionalmente, busca-se identificar os principais gargalos técnicos e regulatórios que ainda limitam a expansão do setor, como a ausência de marcos regulatórios específicos e os elevados custos de implantação e armazenamento (IPEA, 2024; MCKINSEY, 2024; SUDENE, 2024; EY-PARTHENON, 2025). Apesar desses desafios, a articulação entre políticas públicas, inovação tecnológica e parcerias público-privadas apresenta potencial para ampliar a inserção do Maranhão no contexto do hidrogênio verde no Nordeste brasileiro.

Por fim, este artigo contribui para o debate científico e estratégico sobre o papel do Maranhão na economia de baixo carbono, oferecendo subsídios técnicos para o planejamento de políticas energéticas integradas e sustentáveis, alinhadas à valorização de resíduos e à transição para uma matriz energética limpa.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. Hidrogênio verde e processos de eletrólise

O hidrogênio é o elemento químico mais abundante do universo e apresenta elevado potencial como vetor energético, especialmente quando produzido a partir de fontes renováveis. O denominado hidrogênio verde (H_2V) é obtido por meio da eletrólise da água, processo eletroquímico no qual a molécula de H_2O é dissociada em hidrogênio e oxigênio a partir da aplicação de corrente elétrica. Quando essa eletricidade é proveniente de fontes renováveis, o ciclo de produção apresenta emissões diretas praticamente nulas de dióxido de carbono, o que o posiciona como alternativa relevante para a descarbonização energética (EPE, 2023; IEA, 2023).

Do ponto de vista tecnológico, a eletrólise pode ser classificada em três principais rotas: eletrólise alcalina (AEL), eletrólise por membrana de troca de prótons (PEM) e eletrólise de óxido sólido (SOEC). A tecnologia alcalina é a mais consolidada comercialmente, com eficiências típicas entre 60% e 70%, apresentando menores custos de capital, porém menor flexibilidade operacional. Já os sistemas PEM oferecem maior densidade de corrente, rápida resposta dinâmica e maior pureza do hidrogênio produzido, sendo mais adequados para integração com fontes intermitentes. A tecnologia SOEC, ainda em estágio de desenvolvimento mais avançado, opera em altas temperaturas e pode atingir eficiências superiores a 80%, especialmente quando integrada a fontes de calor residual industrial (IEA, 2023; IRENA, 2022; EPE, 2023).

A qualidade da água constitui um fator crítico para o desempenho e a durabilidade dos eletrolisadores. Em geral, exige-se água com elevado grau de pureza — tipicamente deionizada ou desmineralizada — com baixos níveis de sólidos dissolvidos totais (TDS), condutividade reduzida e mínima presença de íons metálicos, de modo a evitar incrustações, corrosão e degradação dos eletrodos e membranas. A literatura técnica indica que a produção de 1 kg de hidrogênio requer aproximadamente 9 litros de água ultrapura, além de volumes adicionais para sistemas auxiliares (IEA, 2023; IRENA, 2022). Nesse contexto, o tratamento prévio da água representa um componente relevante tanto do custo quanto da eficiência global do processo.

Além dos aspectos técnicos, a viabilidade econômica da produção de H_2V está fortemente associada ao custo nivelado do hidrogênio (Levelized Cost of Hydrogen – LCOH), que depende de variáveis como preço da energia elétrica, fator de capacidade da planta, custo dos eletrolisadores, vida útil dos sistemas e custos de operação e manutenção. Estudos recentes apontam que a energia elétrica pode representar entre 60% e 80% do custo total de produção,

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

evidenciando a importância da integração com fontes renováveis de baixo custo (IRENA, 2022; IEA, 2023).

2.2. Uso de efluentes industriais e agroindustriais

O reaproveitamento de efluentes industriais e agroindustriais na produção de hidrogênio verde insere-se no contexto da economia circular e da gestão sustentável de recursos hídricos. Essa abordagem propõe a substituição parcial da água potável por águas residuais tratadas, reduzindo a pressão sobre recursos hídricos e agregando valor a resíduos anteriormente considerados passivos ambientais.

Do ponto de vista técnico, a utilização de efluentes requer etapas rigorosas de pré-tratamento, incluindo processos físico-químicos (coagulação, floculação, filtração) e biológicos, além de polimento avançado (osmose reversa, troca iônica ou eletrodeionização), de modo a atender aos requisitos de pureza exigidos pelos eletrolisadores. A presença de compostos orgânicos, sais dissolvidos e metais pesados pode comprometer a eficiência do processo e reduzir a vida útil dos equipamentos, configurando uma das principais limitações dessa abordagem (IEA, 2023; EMBRAPA, 2023).

Estudos acadêmicos indicam que, quando adequadamente tratados, os efluentes podem alcançar padrões compatíveis com a eletrólise, possibilitando a redução significativa do consumo de água potável e dos custos associados ao seu tratamento. No entanto, essa viabilidade depende da composição do efluente, da tecnologia empregada e da escala do sistema, o que exige análises específicas para cada contexto produtivo.

Além disso, abordagens integradas vêm sendo exploradas, como a combinação de processos bioquímicos (por exemplo, fermentação anaeróbia) com rotas eletroquímicas, ampliando o aproveitamento energético de resíduos orgânicos. Essas estratégias reforçam o papel dos efluentes como insumo energético secundário, embora ainda apresentem desafios tecnológicos e de escala (IEA, 2023; IPEA, 2024).

Sob a perspectiva ambiental, o uso de efluentes contribui para a redução do lançamento de poluentes em corpos hídricos e pode gerar benefícios indiretos, como créditos de carbono e melhoria de indicadores de sustentabilidade hídrica. Entretanto, a literatura destaca que os custos adicionais de tratamento avançado e a necessidade de controle rigoroso da qualidade da água podem limitar sua adoção em larga escala.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

2.3. Potencial energético do Maranhão

O estado do Maranhão apresenta características naturais que o inserem de forma estratégica no contexto da transição energética brasileira, especialmente em relação à expansão das fontes renováveis solar e eólica. Dados do Atlas Solar e Eólico do Maranhão indicam que grande parte do território estadual possui níveis elevados de irradiância solar, com médias superiores a 5,5 kWh/m²/dia em regiões do sul do estado, como Balsas, Porto Franco e Açailândia, valores considerados tecnicamente favoráveis para a implantação de usinas fotovoltaicas de médio e grande porte (IMESC, 2024).

Além do potencial solar, estudos da Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2023) apontam que o litoral maranhense apresenta condições eólicas relevantes, caracterizadas pela regularidade e intensidade dos ventos, especialmente em áreas próximas a São Luís, Raposa e Bacabeira. Esse potencial é compatível com outras regiões do Nordeste brasileiro que já concentram empreendimento consolidados de geração eólica. A complementaridade entre geração solar e eólica representa um aspecto estratégico para sistemas de eletrólise, uma vez que a estabilidade no fornecimento de energia pode contribuir para maior eficiência operacional na produção de hidrogênio verde.

Outro fator relevante refere-se à infraestrutura logística do estado. O Maranhão abriga o Porto do Itaqui, considerado um dos principais corredores de exportação do país, além de conexões ferroviárias e rodoviárias integradas ao agronegócio e ao setor industrial. Essa estrutura pode favorecer, em perspectiva futura, o escoamento de derivados energéticos de baixo carbono, incluindo o hidrogênio verde e seus subprodutos, embora a consolidação dessa cadeia ainda dependa de investimentos em armazenamento, transporte e adaptação tecnológica (IPEA, 2024).

De forma geral, os dados disponíveis sugerem que o Maranhão reúne condições naturais e logísticas potencialmente favoráveis à expansão de projetos relacionados ao hidrogênio verde. Contudo, a efetiva viabilidade desses empreendimentos permanece condicionada a fatores econômicos, regulatórios e tecnológicos, especialmente no que se refere à redução dos custos de produção e à ampliação da infraestrutura energética.

2.4. Políticas energéticas e potencial de integração com efluentes

No âmbito das políticas públicas, iniciativas estaduais e nacionais têm buscado estimular o desenvolvimento de fontes renováveis e de tecnologias associadas ao hidrogênio de baixa emissão de carbono. No Maranhão, programas voltados à expansão das energias renováveis

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

procuram mapear áreas prioritárias para investimentos, integrando informações sobre potencial solar, eólico, infraestrutura elétrica e atividades industriais estratégicas (SEINC, 2024).

Em nível nacional, o Plano Nacional do Hidrogênio (PNH_2) e estudos conduzidos pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE) e pelo Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA) indicam que o Brasil possui vantagens competitivas para a produção de hidrogênio verde, especialmente em regiões com elevada disponibilidade de energia renovável e acesso à água. Entretanto, a literatura destaca que o avanço do setor ainda depende da consolidação de marcos regulatórios específicos, do desenvolvimento de mercado consumidor e da redução dos custos tecnológicos associados à eletrólise (EPE, 2023; IPEA, 2024).

No caso específico do Maranhão, a presença de cadeias agroindustriais relevantes — incluindo processamento de grãos, frigoríficos, indústrias alimentícias e beneficiamento agrícola — sugere a existência de volumes significativos de efluentes com potencial de reaproveitamento energético. Essa condição pode favorecer estratégias de integração entre gestão de resíduos e produção de hidrogênio verde, alinhadas aos princípios da economia circular e da sustentabilidade industrial.

Contudo, a utilização de efluentes em sistemas de eletrólise apresenta limitações técnicas que exigem maior aprofundamento científico. Aspectos como qualidade da água, concentração de impurezas, custos de tratamento e compatibilidade com diferentes tecnologias de eletrolisadores representam fatores críticos para a viabilidade do processo. Assim, embora os dados disponíveis indiquem potencial de integração entre reaproveitamento de efluentes e produção de H_2V, essa possibilidade ainda deve ser compreendida como uma perspectiva analítica dependente de validação empírica e desenvolvimento tecnológico adicional.

3. METODOLOGIA

O presente estudo caracteriza-se como uma pesquisa exploratória, de abordagem qualiquantitativa, fundamentada em análise documental e no uso de dados secundários provenientes de bases institucionais, relatórios técnicos e literatura científica. O objetivo consistiu em avaliar o potencial do estado do Maranhão para a produção de hidrogênio verde a partir de efluentes agroindustriais e industriais, considerando aspectos técnicos, econômicos e ambientais.

A pesquisa não contemplou validação experimental em escala piloto ou industrial. Todas as análises foram baseadas em dados secundários e em parâmetros técnicos consolidados na literatura, não sendo realizados ensaios laboratoriais ou medições diretas de produção ou pureza

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

do hidrogênio. Dessa forma, os resultados apresentados possuem caráter estimativo e analítico, devendo ser interpretados como cenários de viabilidade.

As etapas do estudo foram desenvolvidas entre janeiro e agosto de 2025 e estruturaram-se em quatro procedimentos principais: (i) análise geográfica e ambiental; (ii) levantamento econômico e técnico; (iii) estudo comparativo de insumos.

O levantamento de dados foi realizado por meio de consulta a bases institucionais e plataformas oficiais, utilizadas para obtenção de informações geográficas, energéticas, ambientais e socioeconômicas relacionadas ao potencial de produção de hidrogênio verde no Maranhão. As principais bases utilizadas foram o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2024), a Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2023), o Instituto Maranhense de Estudos Socioeconômicos e Cartográficos (IMESC, 2024), a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA, 2023), o Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA, 2024), a Secretaria de Estado de Indústria e Comércio do Maranhão (SEINC, 2024), a International Renewable Energy Agency (IRENA, 2024), a International Energy Agency (IEA, 2023) e o Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD, 2023). Essas bases forneceram informações relacionadas ao potencial energético, disponibilidade de efluentes, infraestrutura regional, indicadores socioeconômicos e cenários de transição energética utilizados nas análises do estudo.

A seleção das regiões prioritárias considerou critérios combinados, incluindo: (i) elevada disponibilidade de efluentes agroindustriais e industriais; (ii) proximidade de polos produtivos; (iii) acesso à infraestrutura energética (linhas de transmissão e geração renovável); e (iv) baixa restrição ambiental, considerando a proximidade de áreas protegidas. Esses critérios foram aplicados de forma comparativa entre municípios, permitindo a identificação de áreas com maior potencial relativo.

No levantamento econômico, foram utilizados parâmetros da literatura para estimar os custos de implantação, operação e manutenção de plantas de eletrólise voltadas à produção de hidrogênio verde, com base em metodologias da EPE (2023) e IEA (2023). Ressalta-se que os resultados possuem caráter estimativo, fundamentados em dados secundários e não em operação real de plantas industriais.

A viabilidade econômica foi avaliada por meio do custo nivelado do hidrogênio (Levelized Cost of Hydrogen – LCOH), indicador que expressa o custo médio de produção do H_2 ao longo da vida útil do empreendimento. O cálculo foi realizado conforme a equação:

$$LCOH = \frac{CAPEX_{anualizado} + OPEX_{anual}}{H_{anual}}$$

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

em que $CAPEX_{anualizado}$representa o custo anualizado do investimento, $OPEX_{anual}$os custos operacionais anuais e H_{anual}a produção anual estimada de hidrogênio.

O custo anualizado de capital pode ser estimado por meio do Fator de Recuperação de Capital (Capital Recovery Factor – CRF), amplamente utilizado em estudos de viabilidade econômica relacionados à produção de hidrogênio verde. Conforme metodologias apresentadas na literatura especializada, o CRF é representado pela seguinte equação:

$$CRF = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1}$$

em que:

- $i$corresponde à taxa de desconto ou taxa de juros adotada;
- $n$representa a vida útil do projeto ou do equipamento, em anos.

A partir desse fator, o custo anualizado de capital pode ser obtido pela multiplicação do investimento inicial (CAPEX) pelo CRF, conforme procedimentos descritos em estudos da literatura técnica sobre análise econômica de plantas de eletrólise (EPE, 2023; IEA, 2023; IRENA, 2024).

Ressalta-se, contudo, que o presente estudo não realizou aplicação empírica direta dessa modelagem econômica nem cálculo próprio do CRF. As estimativas de custo e viabilidade apresentadas foram derivadas de parâmetros e resultados disponíveis na literatura especializada e em relatórios técnicos de referência, sendo utilizadas apenas como base analítica para construção dos cenários prospectivos discutidos ao longo do trabalho.

Sendo ia taxa de desconto anual e na vida útil estimada do projeto, o custo anualizado de capital pode ser representado pela seguinte relação metodológica:

$$CAPEX_{anualizado} = CAPEX \times CRF$$

De forma complementar, a estimativa do payback simples é geralmente expressa pela razão entre o investimento inicial e o fluxo de caixa anual projetado:

$$Payback = \frac{Investimento\ Inicial}{Fluxo\ de\ Caixa\ Anual}$$

Ressalta-se, contudo, que o presente estudo não realizou cálculos econômicos próprios nem modelagem financeira aplicada especificamente ao contexto maranhense. As equações apresentadas possuem caráter metodológico e foram incluídas por serem amplamente utilizadas na literatura técnica relacionada à viabilidade econômica do hidrogênio verde (EPE, 2023; IEA, 2023; IRENA, 2024).

Da mesma forma, os valores discutidos ao longo do trabalho — incluindo preço médio da energia elétrica, tempo de operação anual, eficiência dos eletrolisadores, CAPEX, OPEX,

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

LCOH e payback — não foram obtidos por simulação econômica desenvolvida nesta pesquisa. Esses parâmetros correspondem a estimativas reportadas em estudos técnicos e projetos de referência nacionais e internacionais, sendo utilizados apenas como base comparativa e analítica.

A adoção da premissa de energia elétrica em torno de R$ 0,22/kWh, por exemplo, decorre de valores médios observados em estudos sobre geração renovável no Nordeste brasileiro, especialmente em cenários associados à expansão da energia solar e eólica. Entretanto, reconhece-se que esse valor pode variar significativamente em função da escala do projeto, da localização, da infraestrutura disponível, do custo de conexão à rede e das condições regulatórias. Assim, não deve ser interpretado como valor definitivo aplicável ao Maranhão.

De maneira semelhante, a premissa de operação anual de 8.000 horas foi incorporada por corresponder a cenários teóricos frequentemente empregados em análises prospectivas da literatura internacional para plantas integradas a fontes renováveis híbridas. No entanto, a efetiva operação contínua depende de fatores técnicos e operacionais que não foram avaliados empiricamente neste estudo.

Os resultados relativos à redução de custos operacionais pelo uso de efluentes tratados, bem como as estimativas de pureza do hidrogênio e desempenho dos sistemas de eletrólise, também derivam exclusivamente de estudos secundários publicados na literatura científica. Nesse sentido, o presente trabalho limitou-se à sistematização, comparação e discussão crítica desses resultados, sem realização de validação experimental, testes laboratoriais ou análises em escala piloto.

Portanto, os cenários econômicos e técnicos apresentados devem ser compreendidos como projeções analíticas fundamentadas em resultados de terceiros, utilizadas para discutir o potencial teórico do Maranhão no contexto da produção de hidrogênio verde a partir de efluentes industriais e agroindustriais.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados foram organizados em cinco subitens, contemplando: (i) análise do potencial energético e da disponibilidade de recursos; (ii) discussões sobre aproveitamento de efluentes e integração energética; (iii) estimativas econômicas reportadas na literatura; (iv) projeções de impactos ambientais e socioeconômicos; e (v) desafios tecnológicos, regulatórios e logísticos associados ao setor. Ressalta-se que as análises apresentadas possuem caráter exploratório e prospectivo, sendo fundamentadas em dados secundários e referências

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

previamente publicadas, não decorrendo de experimentação direta ou validação operacional em escala piloto.

4.1. Potencial energético e análise espacial para produção de hidrogênio verde

A análise espacial do estado do Maranhão foi realizada com base em dados secundários provenientes de bases institucionais, especialmente IMESC (2023) e EPE (2023). Esses dados indicam a distribuição de recursos energéticos e permitem a identificação de áreas com potencial técnico para geração renovável, embora não constituam medições diretas realizadas no âmbito deste estudo.

No que se refere à radiação solar, os dados levantados apontam que municípios da região sul. como Balsas, Porto Franco e Açailândia, apresentam médias superiores a 5,5 kWh/m²/dia, enquanto áreas litorâneas, como São Luís, Raposa e Bacabeira, registram valores próximos a 4,5 kWh/m²/dia. Esses valores, extraídos de bases secundárias, indicam condições técnicas favoráveis à geração fotovoltaica. A interpretação de viabilidade, no entanto, constitui uma inferência analítica, uma vez que depende de variáveis adicionais, como custos, acesso à rede e escala dos empreendimentos.

Em relação ao potencial eólico, dados oficiais da Empresa de Pesquisa Energética (EPE) e do Atlas Solar e Eólico do Maranhão indicam maior regularidade e intensidade dos ventos nas regiões costeiras do estado, especialmente ao longo do litoral maranhense. Estudos da EPE apontam que o litoral do Nordeste — abrangendo áreas desde o Maranhão até a Paraíba — apresenta condições favoráveis para geração eólica, com elevada densidade de potência do vento e estabilidade sazonal relevante para a geração de energia elétrica

No Maranhão, levantamentos realizados pela Plataforma Eosolar e por estudos acadêmicos sobre a costa leste do estado identificaram velocidades de vento mais intensas em municípios próximos às regiões de Barreirinhas e Paulino Neves, com registros variando entre aproximadamente 8 e 12 m/s em períodos de maior intensidade dos ventos

Embora esses dados não tenham sido mensurados diretamente neste estudo, a literatura consultada sustenta a inferência de que a integração entre fontes solar e eólica pode contribuir para maior estabilidade no fornecimento energético, aspecto considerado relevante para processos de eletrólise e produção de hidrogênio verde (H_2V), especialmente em sistemas híbridos de geração renovável.

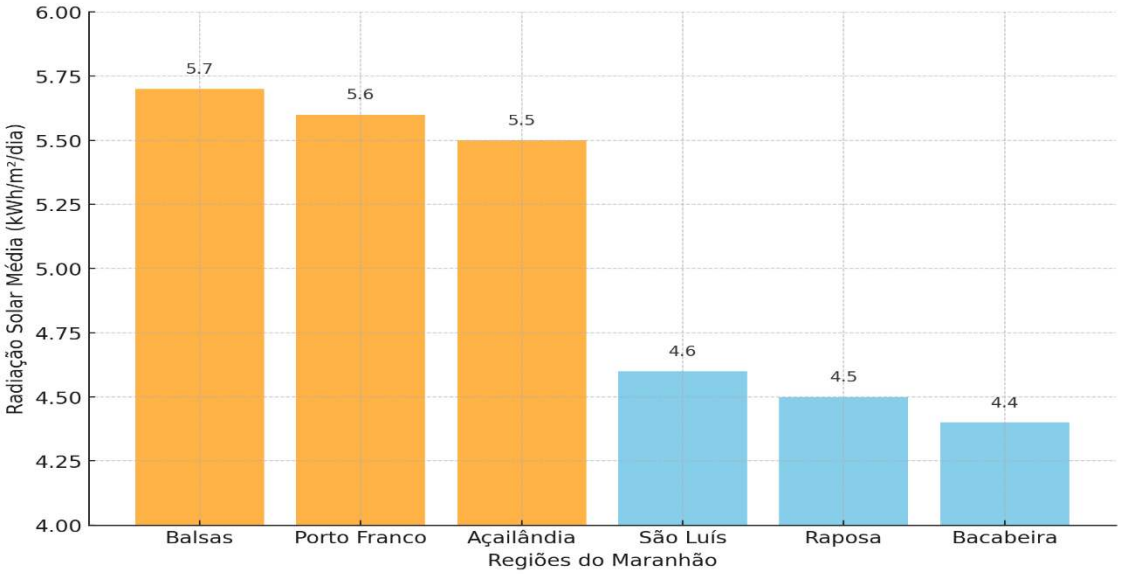
A distribuição espacial das atividades agroindustriais, analisada com base em dados da Embrapa (2023) e do PNUD (2023), indica maior concentração no sul do Maranhão, com destaque para os segmentos de processamento de grãos, frigoríficos, laticínios e indústrias

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

alimentícias. Esses setores geram volumes expressivos de efluentes com elevada carga orgânica, sugerindo potencial para reaproveitamento em sistemas de produção de hidrogênio verde. A proximidade entre fontes de efluentes e possíveis unidades produtivas pode contribuir para a redução de custos logísticos e operacionais, embora essa relação ainda dependa de validação em estudos mais detalhados. Gráfico 1 apresenta a variação da radiação solar média (kWh/m²/dia) entre as regiões analisadas, sintetizando os dados utilizados na caracterização do potencial energético. Observa-se maior intensidade nas áreas do sul do estado, em comparação com a faixa litorânea, embora ambas se situem em intervalos considerados tecnicamente aproveitáveis para geração fotovoltaica.

De forma geral, os dados levantados indicam que o Maranhão dispõe de recursos energéticos diversificados e distribuição espacial de atividades produtivas que pode favorecer a integração entre geração renovável e uso de insumos industriais. Entretanto, a interpretação desses resultados como indicativo de viabilidade para um polo de hidrogênio verde constitui uma projeção, que depende de análises complementares, incluindo avaliação econômica detalhada, definição regulatória e validação em escala piloto.

Gráfico 1. Radiação solar média nas regiões do Maranhão e potencial para produção de hidrogênio verde



Fonte: IMESC, 2023.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

4.2. Disponibilidade de efluentes

A caracterização dos efluentes baseou-se em dados secundários da Embrapa (2023) e do CNPTIA (2023), os quais indicam que resíduos provenientes de agroindústrias, frigoríficos e indústrias alimentícias no Maranhão apresentam, em geral, elevada carga orgânica. Esse dado empírico sustenta a inferência de que tais efluentes podem ser considerados como insumo potencial para processos associados à produção de hidrogênio verde (H_2V), desde que submetidos a etapas adequadas de tratamento. Ressalta-se que essa avaliação possui caráter estimativo, não decorrendo de análises laboratoriais realizadas no âmbito deste estudo. Quanto à disponibilidade, os dados analisados sugerem que o volume de efluentes tratados nas regiões sul e leste do estado pode ser compatível, em termos teóricos, com o abastecimento de plantas modulares de pequeno porte (por exemplo, na ordem de 1 MW). Essa interpretação configura uma inferência analítica, condicionada a variáveis como eficiência dos sistemas de tratamento, qualidade final da água e parâmetros operacionais da eletrólise, não sendo generalizável sem validação em escala local.

No plano ambiental, a literatura aponta que o reaproveitamento de efluentes pode contribuir para a redução da carga poluidora lançada em corpos hídricos e para a diminuição da demanda por água potável. Esses efeitos, reportados em estudos prévios, fundamentam a interpretação de alinhamento dessa abordagem com práticas de gestão sustentável de recursos hídricos e com princípios da economia circular. Trata-se, contudo, de uma extrapolação baseada em evidências externas, não mensurada diretamente neste estudo.

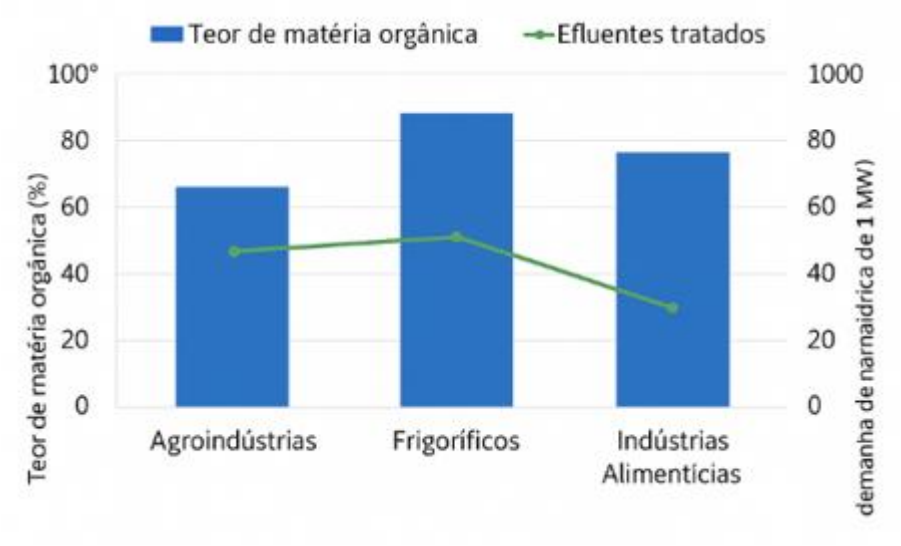
No que se refere à adequação técnica, estudos experimentais indicam que, após pré-tratamento físico-químico e etapas de purificação (como filtração avançada, osmose reversa ou deionização), efluentes industriais podem atingir níveis de qualidade compatíveis com os requisitos da eletrólise, permitindo a obtenção de hidrogênio com elevados graus de pureza. Esses resultados, entretanto, foram obtidos em contextos específicos e sob condições controladas, não sendo diretamente reproduzidos nesta pesquisa (Santos et al., 2022; Souza; Barros, 2023).

O Gráfico 2 sintetiza a estimativa de disponibilidade de efluentes nas regiões analisadas, evidenciando maior concentração em áreas com intensa atividade agroindustrial. Esse padrão espacial, derivado dos dados levantados, sustenta a hipótese de integração entre geração de resíduos e produção energética. Ainda assim, a viabilidade dessa integração deve ser entendida como projeção, dependente de análises complementares de natureza técnica, econômica e regulatória.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

De forma geral, os resultados indicam que a integração entre tratamento de efluentes e produção de H_2V constitui uma possibilidade tecnicamente plausível no contexto analisado. Entretanto, sua consolidação em escala industrial depende de fatores adicionais, incluindo custos de tratamento, padronização da qualidade da água, adequação dos eletrolisadores e validação empírica em condições operacionais reais.

Gráfico 2. Potencial dos efluentes industriais para a produção de hidrogênio verde no Maranhão



Fonte: EMBRAPA, 2023; CNPTIA, 2023

A integração entre o tratamento de efluentes e a produção de hidrogênio verde (H_2V) é apontada na literatura como uma estratégia potencial para promover a economia circular, ao favorecer o reaproveitamento de recursos e a redução de impactos ambientais associados ao descarte de resíduos. No contexto maranhense, dados institucionais e estudos setoriais sugerem que essa abordagem pode contribuir para o fortalecimento da sustentabilidade da cadeia produtiva industrial. Essa interpretação, contudo, configura uma inferência analítica, dependente de condições técnicas, econômicas e regulatórias específicas.

No que se refere ao suporte institucional, iniciativas como o Programa Estadual de Energias Renováveis (Eosolar) e o Atlas Solar e Eólico do Maranhão constituem instrumentos relevantes para o planejamento energético. Esses mecanismos, conforme dados da SEINC (2023) e do IMESC (2023), fornecem bases informacionais para a identificação de áreas com potencial de geração renovável. Entretanto, sua efetividade na viabilização de projetos de H_2V

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

depende de fatores complementares, incluindo regulamentação específica, incentivos econômicos e capacidade de implementação.

No que se refere aos custos operacionais, informações disponibilizadas pela EMBRAPA e pelo CNPTIA apontam que o uso de efluentes tratados pode contribuir para a redução de despesas relacionadas ao consumo de água potável e às etapas convencionais de tratamento hídrico. As estimativas apresentadas por essas instituições indicam reduções que podem alcançar valores próximos a 35%, variando conforme a qualidade do efluente, o nível de tratamento requerido e as especificações técnicas dos sistemas de eletrólise (EMBRAPA, 2023; CNPTIA, 2023). Esses valores devem ser compreendidos como referências comparativas obtidas a partir de dados secundários, não mensurados diretamente neste trabalho.

Quanto ao custo nivelado do hidrogênio (Levelized Cost of Hydrogen – LCOH), dados apresentados pelo IPEA indicam que o Brasil possui condições potencialmente favoráveis para a redução dos custos de produção de hidrogênio verde, sobretudo em cenários com elevada participação de fontes renováveis. As projeções consultadas sugerem a possibilidade de redução do LCOH para valores próximos a US$ 1,69/kg até 2030, condicionada a fatores como avanço tecnológico, ganho de escala produtiva e estabilidade regulatória (IPEA, 2024).

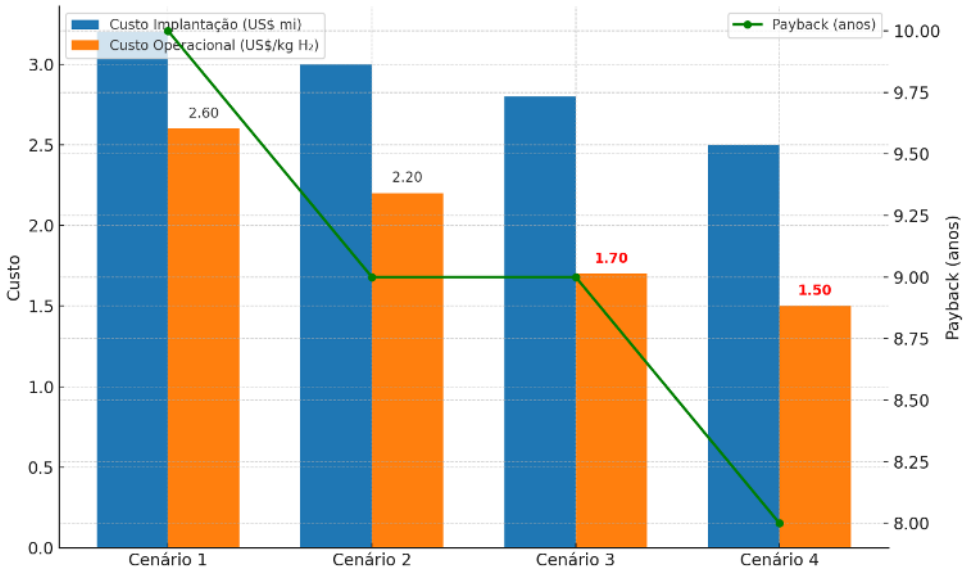
O Gráfico 3 sintetiza a comparação entre quatro cenários construídos a partir dessas variáveis, permitindo visualizar diferenças nos custos estimados e no tempo de retorno:

- Cenário 1 – Água potável, sem integração renovável: apresenta os maiores custos estimados de implantação (cerca de US$ 3,2 milhões) e operação (aproximadamente US$ 2,60/kg H_2), com payback em torno de 10 anos, caracterizando um cenário de menor eficiência relativa.
- Cenário 2 – Água potável com integração solar/eólica: indica redução moderada nos custos de implantação (cerca de US$ 3,0 milhões) e operacionais (aproximadamente US$ 2,20/kg H_2), com payback estimado em 9 anos, associada à incorporação parcial de energia renovável.
- Cenário 3 – Efluentes tratados, sem integração renovável: sugere redução nos custos operacionais (aproximadamente US$ 1,70/kg H_2), associada ao menor consumo de água potável. O custo de implantação foi estimado em torno de US$ 2,8 milhões, com payback próximo a 9 anos.
- Cenário 4 – Efluentes tratados com integração solar/eólica: apresenta os menores valores estimados de custo de implantação (cerca de US$ 2,5 milhões) e operação (aproximadamente US$ 1,50/kg H_2), com payback estimado em 8 anos, configurando o cenário mais favorável entre os analisados, dentro das premissas adotadas.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

De forma geral, os resultados indicam que a adoção de estratégias integradas — especialmente o uso de efluentes tratados e a incorporação de fontes renováveis — pode contribuir para a melhoria dos indicadores econômicos. Ainda assim, essas conclusões devem ser interpretadas como projeções analíticas, cuja consolidação depende de validações empíricas, condições de mercado e avanços tecnológicos.

Gráfico 3. Estimativa de Custos e Viabilidade Econômica de Planta Modular de H_2V de 1 MW no Maranhão



Fonte: FIGUEIREDO (2025).

4.4. Impactos ambientais e sociais positivos

O Gráfico 4 reúne estimativas derivadas de estudos técnico-científicos (Santos et al., 2022) que analisam o potencial da produção de hidrogênio verde (H_2V) a partir do uso de efluentes tratados. Ressalta-se que os valores apresentados não resultam de medições realizadas neste estudo, sendo baseados exclusivamente em dados secundários disponíveis na literatura. Dessa forma, os resultados devem ser interpretados como projeções analíticas construídas a partir de cenários previamente investigados, e não como evidências empíricas diretas do contexto analisado.

De acordo com essas fontes, a adoção dessa abordagem está associada, em termos teóricos, a possíveis benefícios ambientais, especialmente no que se refere à redução do consumo de água potável e à mitigação de emissões de gases de efeito estufa. Estimativas

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

indicam que uma planta de 1 MW poderia reduzir o consumo de água potável em aproximadamente 4,2 milhões de litros por mês, valor que evidencia o potencial de racionalização do uso de recursos hídricos em processos industriais. Da mesma forma, cenários que consideram o uso de eletrólise alimentada por fontes renováveis — como solar e eólica — apontam para potencial redução de emissões de CO_2, sobretudo quando comparados a rotas convencionais baseadas em combustíveis fósseis. Contudo, tais resultados dependem de condições específicas de operação, como eficiência energética, estabilidade no fornecimento de energia e qualidade do insumo hídrico, não tendo sido verificados empiricamente neste estudo (MA, 2023).

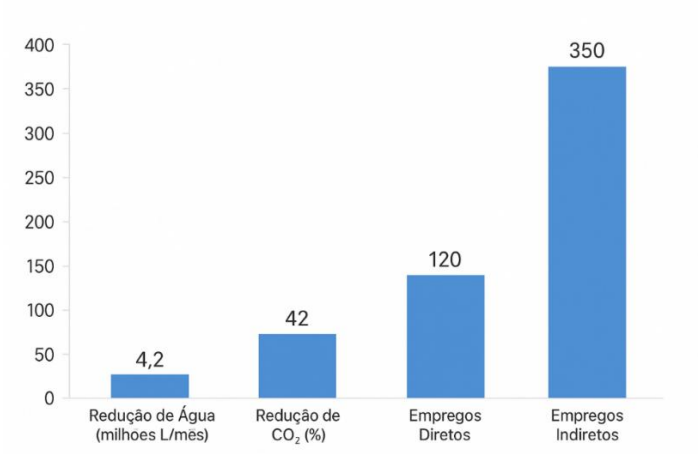
No que se refere aos impactos socioeconômicos, a literatura consultada sugere que a implantação de unidades produtivas de H_2V pode gerar empregos diretos e indiretos, particularmente em atividades relacionadas à operação, manutenção e cadeia logística associada. Estimativas indicam a criação de aproximadamente 120 empregos diretos e 350 indiretos para plantas de médio porte, contribuindo potencialmente para a dinamização econômica regional. Ainda assim, esses valores devem ser interpretados como referências indicativas, uma vez que podem variar significativamente em função da escala do empreendimento, do nível de automação adotado, da maturidade tecnológica e das características específicas do território onde a planta é implantada (PNUD, 2023; Santos et al., 2022). O reaproveitamento de efluentes industriais também é apontado na literatura como estratégia potencial para a redução da carga poluidora em corpos hídricos, contribuindo para a melhoria da qualidade ambiental e para o atendimento a padrões mais rigorosos de gestão de resíduos. Essa interpretação baseia-se em evidências externas e depende diretamente de fatores como a eficiência dos sistemas de tratamento, o controle rigoroso da qualidade da água e a compatibilidade tecnológica com os processos de eletrólise empregados. Ademais, a variabilidade na composição dos efluentes pode representar um desafio adicional, exigindo adaptações técnicas específicas para garantir a estabilidade operacional dos sistemas.

De forma geral, os resultados indicam que a integração entre produção de hidrogênio verde e reaproveitamento de efluentes constitui uma possibilidade com potencial de contribuição nas dimensões ambiental, econômica e social, especialmente no contexto de estratégias voltadas à economia circular. Entretanto, a consolidação dessa abordagem no contexto maranhense deve ser compreendida como uma projeção analítica, cuja efetivação depende de validações empíricas, desenvolvimento tecnológico contínuo e estabelecimento de condições institucionais e regulatórias favoráveis. Nesse sentido, recomenda-se cautela na interpretação

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

dos resultados, bem como o aprofundamento de estudos futuros que incorporem análises experimentais e aplicações em escala piloto.

Gráfico 4. Principais impactos positivos da produção de hidrogênio verde (H_2V) a partir de efluentes tratados no Maranhão



Fonte: Santos et al., 2022

4.5. Desafios

Apesar do potencial identificado, a produção de hidrogênio verde (H_2V) está associada a desafios relevantes no contexto analisado. Dados institucionais indicam que a infraestrutura de armazenamento e transporte de hidrogênio no estado ainda é limitada, o que pode demandar investimentos adicionais para viabilizar a logística de distribuição com segurança e eficiência (MA, 2023). Essa constatação baseia-se em informações secundárias e deve ser interpretada como diagnóstico geral, sujeito a variações conforme projetos específicos.

Do ponto de vista institucional, a literatura aponta que o arcabouço regulatório para o setor de hidrogênio de baixo carbono no Brasil encontra-se em fase de consolidação. Nesse contexto, a Lei nº 14.948/2024 representa um avanço na definição de diretrizes normativas, embora sua efetividade dependa de regulamentações complementares e da articulação entre diferentes esferas de governo. A viabilização de empreendimentos nessa área também é frequentemente associada, na literatura, à necessidade de parcerias público-privadas e investimentos em capacitação técnica, o que configura uma inferência baseada em experiências de outros contextos.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

4.6. Custo nivelado do hidrogênio estimado

A análise de viabilidade econômica foi conduzida com base em premissas extraídas de dados secundários da literatura técnica e de projetos de referência. Considerou-se um preço médio da energia elétrica de R$ 0,22/kWh, compatível com empreendimento solares e eólicos no Nordeste brasileiro, bem como um regime operacional de 8.000 horas anuais. As eficiências dos eletrolisadores foram adotadas como valores médios reportados na literatura: aproximadamente 65% para tecnologia alcalina, 70% para PEM e até 80% para SOEC (EPE, 2023; IPEA, 2024). Esses parâmetros constituem insumos analíticos, não resultantes de medições realizadas neste estudo.

Os custos de capital (CAPEX) foram estimados em uma faixa entre US$ 900 e US$ 1.500 por kW instalado, variando conforme a tecnologia e a escala do projeto. Já os custos operacionais (OPEX) foram considerados em torno de 3% do investimento inicial ao ano. A utilização de efluentes tratados como insumo hídrico foi incorporada como hipótese de redução de custos operacionais, com base em estudos que indicam economias potenciais próximas a 35%. Essa estimativa, entretanto, depende de fatores como qualidade do efluente, nível de tratamento requerido e configuração tecnológica adotada.

Com base nessas premissas, o custo nivelado do hidrogênio (Levelized Cost of Hydrogen – LCOH) foi estimado em uma faixa entre US$ 3,2 e US$ 4,1 por kg de H_2. Esses valores resultam de modelagem teórica e variam conforme a tecnologia de eletrólise, o custo da energia elétrica e o grau de integração com fontes renováveis. Ressalta-se que tais estimativas possuem caráter indicativo, não sendo derivadas de operação real em escala industrial.

O período de retorno do investimento (payback) foi estimado entre 6 e 9 anos para plantas de médio porte, considerando diferentes cenários de eficiência operacional e integração energética. Esse intervalo configura uma projeção analítica baseada em dados secundários e está sujeito a variações decorrentes de fatores como políticas de incentivo, oscilações no custo da energia e evolução do mercado de hidrogênio no Brasil.

5. Considerações Finais

Os resultados analisados ao longo deste estudo, fundamentados em dados secundários, documentos institucionais e referências técnico-científicas, indicam que o Maranhão apresenta características potencialmente favoráveis ao desenvolvimento de iniciativas relacionadas à produção de hidrogênio verde (H_2V), especialmente em cenários que consideram a integração entre fontes renováveis de energia e o reaproveitamento de efluentes agroindustriais e industriais. Essa interpretação decorre da combinação de fatores como disponibilidade de

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

radiação solar, potencial eólico, presença de cadeias agroindustriais relevantes e infraestrutura logística estratégica já existente no estado.

No campo técnico, as análises desenvolvidas sugerem que o reaproveitamento de efluentes pode representar uma alternativa potencialmente aplicável em processos associados à produção de H_2V, desde que atendidos requisitos relacionados ao tratamento e ao controle de qualidade da água. Embora esta pesquisa não tenha realizado validação experimental, os dados consultados indicam possibilidades de integração entre gestão de resíduos, geração energética e princípios de economia circular, reforçando o interesse crescente por soluções industriais de baixo carbono.

Sob a perspectiva econômica, os cenários analisados apontam que a viabilidade da produção de H_2V permanece fortemente condicionada ao custo da energia renovável, ao avanço tecnológico dos sistemas de eletrólise, à escala produtiva e à existência de incentivos econômicos e institucionais. As estimativas de LCOH, payback e custos operacionais discutidas neste trabalho devem ser compreendidas como projeções teóricas derivadas de estudos de referência, e não como resultados operacionais obtidos em condições reais de implantação.

Em termos ambientais e sociais, os dados secundários utilizados sugerem que a integração entre produção de hidrogênio verde e reaproveitamento de efluentes pode contribuir para a redução do consumo de água potável, mitigação de emissões de gases de efeito estufa e diminuição da carga poluidora lançada em corpos hídricos. Além disso, as projeções consultadas apontam potencial de geração de empregos diretos e indiretos associados à cadeia produtiva do H_2V, sobretudo em atividades relacionadas à operação, manutenção e infraestrutura energética.

No que se refere aos aspectos regulatórios e institucionais, identificou-se que a consolidação do setor ainda depende da evolução de marcos legais específicos, da ampliação da infraestrutura logística e de armazenamento e da articulação entre poder público, setor produtivo e instituições de pesquisa. A ausência de regulamentações plenamente consolidadas, somada aos elevados custos tecnológicos e à necessidade de investimentos estruturais, constitui um dos principais gargalos para expansão do hidrogênio verde no contexto brasileiro e regional.

Como agenda futura de pesquisa, destaca-se a necessidade de desenvolvimento de projetos piloto, análises de ciclo de vida, avaliações econômicas mais detalhadas e investigações aplicadas sobre a qualidade e o potencial energético dos efluentes disponíveis em diferentes cadeias agroindustriais. Essas abordagens poderão contribuir para validação empírica das hipóteses discutidas neste trabalho e para o aprimoramento da robustez analítica das projeções apresentadas.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Dessa forma, os resultados obtidos sugerem que o Maranhão possui atributos que podem favorecer sua inserção futura no contexto da transição energética e da economia de baixo carbono. Entretanto, a consolidação desse cenário permanece condicionada a fatores tecnológicos, econômicos, regulatórios e institucionais, devendo as projeções aqui discutidas ser interpretadas como possibilidades analíticas fundamentadas em dados secundários e não como conclusões definitivas.

REFERÊNCIAS

ACCIONA ENERGIA. Como o hidrogênio verde é produzido a partir de resíduos agrícolas e com uma eficiência inédita. São Paulo, 2023. Disponível em: https://www.acciona.com.br/novidades/artigos/como-o-hidrogenio-verde-e-produzido-a-partir-de-residuos-agricolas-e-com-uma-eficiencia-inedita. Acesso em: 18 out. 2025.

ALVARENGA, Paulo. O hidrogênio verde e a transição para uma economia de baixo carbono. Revista Brasil/Alemanha, ano 29, n. 1, p. 42–45, out. 2021.

BRASIL. Empresa de Pesquisa Energética (EPE). Plano Nacional de Energia 2050. Brasília, 2023.

BRASIL. Empresa de Pesquisa Energética (EPE). Relatório técnico sobre o potencial de hidrogênio verde no Brasil. Rio de Janeiro, 2023.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia (MME). Plano Nacional do Hidrogênio (PNH_2). Brasília, 2023.

CNPTIA – CENTRO NACIONAL DE PESQUISA EM TECNOLOGIA DA INFORMAÇÃO AGROPECUÁRIA. Reuso de efluentes agroindustriais na geração de energia limpa. Campinas: Embrapa, 2023.

EMBRAPA. Levantamento bibliométrico sobre hidrogênio verde e energias renováveis no Brasil. Brasília, 2023. Disponível em: https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1168182/1/BPD-30-Levantamento-bibliometrico.pdf. Acesso em: 18 out. 2025.

EMBRAPA. Tratamento de efluentes industriais e aproveitamento energético no Brasil. Campinas, 2023.

EY-PARTHENON. Falta de infraestrutura e de tecnologia pode comprometer o hidrogênio verde no Brasil. São Paulo, 2025. Disponível em: https://www.ey.com/pt_br/newsroom/2025/08/falta-infraestrutura-tecnologia-pode-comprometer-hidrogenio-verde-brasil. Acesso em: 18 out. 2025.

FIGUEIREDO, Luiz Gustavo Rodrigues. *Produção de hidrogênio verde no Maranhão: análise de potenciais áreas e da viabilidade técnico-econômica*. 2025. 134 f. Dissertação (Mestrado em Energia e Ambiente) – Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2025. Disponível em:. Acesso em: 21 maio 2026.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Base de dados geográficos e estatísticos municipais. Rio de Janeiro, 2024.

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA (IPEA). Cenários energéticos e sustentabilidade ambiental no Brasil. Brasília, 2024.

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA (IPEA). Potencial energético e transição sustentável no Brasil. Brasília, 2024. Disponível em: https://repositorio.ipea.gov.br/. Acesso em: 18 out. 2025.

INSTITUTO MARANHENSE DE ESTUDOS SOCIOECONÔMICOS E CARTOGRÁFICOS (IMESC). Atlas Solar e Eólico do Maranhão. São Luís, 2024.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (IRENA). Green hydrogen cost reduction: scaling up electrolysers to meet the 1.5°C climate goal. Abu Dhabi, 2020. Disponível em: https://www.irena.org/publications/2020/Dec/Green-hydrogen-cost-reduction. Acesso em: 18 out. 2025.

MA – GOVERNO DO MARANHÃO. Hidrogênio verde no Maranhão: avanços na matriz energética sustentável. São Luís, 2023. Disponível em: https://www.ma.gov.br/noticias/hidrogenio-verde-maranhao-avanca-na-corrida-por-uma-matriz-energetica-sustentavel. Acesso em: 18 out. 2025.

MCKINSEY & COMPANY. Hidrogênio verde: uma oportunidade de geração de riqueza com sustentabilidade, para o Brasil e o mundo. São Paulo, 2024.

PNUD – PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O DESENVOLVIMENTO. Indicadores de desenvolvimento humano municipal. Nova York, 2023.

REVISTA CONTRIBUCIONES A LAS CIENCIAS SOCIALES. *Economia circular, reaproveitamento de efluentes e sustentabilidade energética*. Málaga: Eumed.net, v. 17, n. 4, 2024. Disponível em: https://ojs.eumed.net/rev/index.php/cccss. Acesso em: 18 out. 2025.

REVISTA GESEC. A sustentabilidade na gestão de resíduos e efluentes industriais. Revista Gestão e Secretariado, São Paulo, v. 14, n. 3, p. 88–102, 2023.

SANTOS, M. A.; SILVA, P. R.; MOURA, E. C. Eletrolisadores híbridos aplicados ao tratamento de efluentes industriais para produção de hidrogênio verde. Revista Sustenere, v. 13, n. 2, p. 45–60, 2022.

SEINC – SECRETARIA DE INDÚSTRIA, COMÉRCIO E ENERGIA DO MARANHÃO. Energia renovável no Maranhão. São Luís, 2024. Disponível em: https://seinc.ma.gov.br/energia-renovavel. Acesso em: 18 out. 2025.

SEINC – SECRETARIA DE INDÚSTRIA, COMÉRCIO E ENERGIA DO MARANHÃO. Programa Estadual de Energias Renováveis e Sustentabilidade – Eosolar. São Luís, 2023.

SOUZA, R. F.; BARROS, T. L. Avaliação comparativa da eletrólise alcalina e PEM no reaproveitamento de efluentes industriais. Revista Brasileira de Energia Sustentável, v. 10, n. 4, p. 112–129, 2023.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

SUDENE – SUPERINTENDÊNCIA DO DESENVOLVIMENTO DO NORDESTE. Produção de hidrogênio verde demandará reestruturação da malha ferroviária do Nordeste. Recife, 2024.

SUSTENERE. Hidrogênio verde como vetor energético limpo: exploração educacional e experimental da eletrólise. Natural Resources, v. 14, n. 3, 2024.

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO (USP). Hidrogênio verde: o Brasil se tornará uma potência mundial? São Paulo: Instituto de Energia e Meio Ambiente, 2024.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.