



## Hidrogênio verde como vetor da descarbonização energética no Brasil

### Green hydrogen as a vector for energy decarbonization in Brazil

### Hidrógeno verde como vector de la descarbonización energética en Brasil

**Pedro Henrique Rosan Silva** E-mail: [pedrorosan@gmail.com](mailto:pedrorosan@gmail.com)

Cobra Brasil, Rio de Janeiro/RJ, Brasil

**Victor Hugo Souza de Abreu** E-mail: [vhsa@poli.ufrj.br](mailto:vhsa@poli.ufrj.br)

Universidade Federal do Rio de Janeiro (DET/POLI/UFRJ), Rio de Janeiro/RJ, Brasil



**Resumo:** Este artigo avalia o potencial do hidrogênio verde no Brasil sob as perspectivas técnica, econômica e regulatória, posicionando-o como elemento estratégico na transição energética. Destaca-se a sinergia entre as fontes renováveis solar e eólica, cuja complementaridade assegura maior estabilidade na geração elétrica e maior eficiência na produção de hidrogênio por eletrólise. A partir da análise dos Complexos Chafariz e Luzia, verifica-se que projetos integrados apresentam alta viabilidade técnica e um custo nivelado de hidrogênio (LCOH) competitivo, estimado em US\$ 2,70/kg. No entanto, persistem obstáculos, especialmente a carência de um marco regulatório consistente, essencial para atrair investimentos internacionais e garantir segurança jurídica. A recente aprovação da Lei nº 14.948/2024, que institui o Marco Legal do Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono, representa um avanço importante, embora ainda dependa de regulamentações complementares para sua efetiva aplicação. Conclui-se que, com incentivos adequados e parcerias estratégicas, o Brasil reúne condições para se destacar como líder global no mercado de hidrogênio verde, contribuindo para a descarbonização da matriz energética e para o desenvolvimento sustentável.

**Palavras-chave:** hidrogênio verde; energia renovável; marco regulatório.

**Abstract:** This paper assesses the potential of green hydrogen in Brazil from technical, economic, and regulatory perspectives, positioning it as a strategic element in the energy transition. It highlights the synergy between solar and wind renewable sources, whose complementarity ensures greater stability in power generation and improved efficiency in hydrogen production via electrolysis. Based on data from the Chafariz and Luzia Complexes, the analysis shows that integrated projects demonstrate high technical feasibility and a competitive Levelized Cost of Hydrogen (LCOH), estimated at US\$ 2.70/kg. However, challenges remain, particularly the lack of a robust regulatory framework, which is essential to attract international investment and provide legal certainty. The recent enactment of Law No. 14,948/2024, which establishes the Legal Framework for Low-Carbon Hydrogen, marks a significant step forward, though it still requires complementary regulations for effective implementation. The study concludes that, with appropriate incentives and strategic partnerships, Brazil is well positioned to become a global leader in the green hydrogen market, contributing to energy decarbonization and sustainable development.

**Keywords:** green hydrogen; renewable energy; regulatory framework.

**Resumen:** Este artículo evalúa el potencial del hidrógeno verde en Brasil desde las perspectivas técnica, económica y regulatoria, posicionándolo como un elemento estratégico en la transición energética. Se destaca la sinergia entre las fuentes renovables solar y eólica, cuya complementariedad garantiza una mayor estabilidad en la generación eléctrica y mayor eficiencia en la producción de hidrógeno mediante electrólisis. A partir del análisis de los Complejos Chafariz y Luzia, se verifica que los proyectos integrados presentan una alta viabilidad técnica y un costo nivelado de hidrógeno (LCOH) competitivo, estimado en 2,70 USD/kg. Sin embargo, persisten obstáculos, especialmente la falta de un marco regulatorio consistente, esencial para atraer inversiones internacionales y garantizar seguridad jurídica. La reciente aprobación de la Ley N° 14.948/2024, que establece el Marco Legal del Hidrógeno de Baja Emisión de Carbono, representa un avance importante, aunque aún depende de reglamentaciones complementarias para su aplicación efectiva. Se concluye que, con incentivos adecuados y alianzas estratégicas, Brasil tiene condiciones para destacarse como líder global en el mercado de hidrógeno verde, contribuyendo a la descarbonización de la matriz energética y al desarrollo sostenible.

**Palabras clave:** hidrógeno verde; energía renovable; marco regulatorio.

## Introdução

A transição energética representa um dos maiores desafios e oportunidades do século XXI, destacando-se como uma prioridade global para combater as mudanças climáticas e promover a sustentabilidade ambiental. Nesse cenário, o hidrogênio verde desponta como uma solução inovadora, sendo produzido por meio da eletrólise da água alimentada por fontes de energia renovável, como eólica e solar. Esse gás, isento de emissões de carbono durante sua produção e uso, oferece aplicações versáteis que vão desde a substituição de combustíveis fósseis na indústria e transporte até seu uso como vetor energético para armazenar energia limpa e mitigar a intermitência das fontes renováveis [Pereira; Santos; Abreu, 2024; Santos e Abreu, 2024].

O Brasil, com sua matriz energética predominantemente renovável e vasto potencial de geração solar e eólica, ocupa uma posição privilegiada no cenário global. Estudos apontam que a capacidade instalada de energia eólica e solar no país alcançou mais de 23 GW em 2023, com previsão de crescimento 27,7% até 2030, de acordo com o Plano Decenal de Expansão de Energia (PDE) de 2031 [EPE, 2022]. Adicionalmente, a geração solar distribuída já ultrapassou a marca de 18 GW no mesmo ano, consolidando-se como um pilar estratégico para a eletrificação sustentável.

Destaca-se que o Brasil pode não apenas atender à sua demanda interna, mas também posicionar-se como um dos maiores exportadores mundiais desse insumo energético, especialmente para mercados como a União Europeia, que busca alternativas para reduzir sua dependência de combustíveis fósseis [Abreu; Santos, 2024; Pimentel, 2023; Silva, 2022].

Contudo, a concretização do potencial do hidrogênio verde no Brasil enfrenta desafios significativos. A ausência de um marco regulatório abrangente, a necessidade de infraestrutura específica para produção e transporte, bem como os custos elevados de tecnologias como eletrolisadores, são alguns dos gargalos que precisam ser superados. Ainda assim, iniciativas como o Programa Nacional do Hidrogênio (PNH<sub>2</sub>), lançado em 2021, e os investimentos em pesquisa e desenvolvimento pelo Centro Nacional de Referência em Energia do Hidrogênio (CENEH) oferecem uma base promissora para impulsionar esse mercado.

Diante desse cenário, surge a pergunta central que orienta este estudo: como o Brasil pode explorar plenamente seu potencial renovável para integrar o hidrogênio verde em sua matriz energética e torná-lo uma *commodity* global estratégica? A resposta a essa questão exige a análise de múltiplos fatores, incluindo políticas públicas, viabilidade econômica, avanços tecnológicos e os impactos ambientais associados.

Este artigo busca investigar as condições técnicas, econômicas e regulatórias necessárias para consolidar o Brasil como líder global na produção e exportação de hidrogênio verde, explorando seu vasto potencial renovável. Além disso, como objetivos específicos, têm-se:

1. Revisar o estado da arte sobre hidrogênio verde, com foco na integração de fontes híbridas (eólica e solar).
2. Mapear os desafios e oportunidades regulatórias no contexto brasileiro, com destaque para as normas da ANEEL, ONS e MME.
3. Analisar projetos pioneiros de referência, como a planta piloto da Eletrobras e um parque híbrido (eólica e solar) da Neoenergia, para dimensionamento de sistemas de hidrogênio.
4. Avaliar a viabilidade econômica de projetos híbridos e sua competitividade no mercado internacional.
5. Identificar os benefícios ambientais e os desafios relacionados à implementação em larga escala do hidrogênio verde no Brasil.

O hidrogênio verde é uma solução estratégica para a descarbonização global, oferecendo oportunidades para transformar economias inteiras e alcançar metas climáticas, como as do Acordo de Paris. O Brasil, com sua abundância de recursos naturais e matriz energética diversificada, tem uma oportunidade única de liderar esse movimento. No entanto, para que o hidrogênio verde se torne uma realidade viável, é essencial alinhar os esforços de inovação tecnológica com políticas públicas robustas e incentivos econômicos. Este trabalho visa a buscar conhecimentos existentes e contribuir para a construção de um arcabouço técnico-científico que facilite a materialização desse potencial.

Em 2024, o Brasil consolidou um avanço significativo ao sancionar a Lei nº 14.948/2024, que estabelece o marco legal do hidrogênio de baixa emissão de carbono. Essa legislação cria a Política Nacional do Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono e o Regime Especial de Incentivos para a Produção [Rehidro], trazendo dispositivos voltados à desoneração fiscal, ao estímulo à pesquisa, à segurança jurídica e à definição de padrões técnicos e ambientais. A medida sinaliza o amadurecimento institucional da agenda do hidrogênio, alinhando o país às práticas internacionais e oferecendo uma base para novos modelos de negócios baseados em energias renováveis. Dentre os principais dispositivos, destacam-se: a criação do Programa de Desenvolvimento do Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono [PHBC], os incentivos tributários aplicáveis à cadeia produtiva do hidrogênio e a previsão de integração dos marcos da ANEEL, ONS e Ministério de Minas e Energia. Essa legislação preenche lacunas regulatórias previamente mapeadas e amplia a confiança de investidores em projetos com alto risco tecnológico e operacional, como os de eletrólise renovável. Portanto, é fundamental considerar seus efeitos ao longo deste artigo, que busca justamente discutir as promessas e os obstáculos da difusão do hidrogênio verde no Brasil.

Além desta seção introdutória, a Seção 2 aborda os fundamentos conceituais e técnicos do hidrogênio verde, destacando seu papel na transição energética global e as principais tecnologias de produção, com ênfase na eletrólise da água a partir de fontes renováveis. A Seção 3 apresenta o panorama brasileiro de geração de energia renovável, com foco na complementaridade entre as matrizes solar e eólica, e discute a viabilidade da integração dessas fontes na produção de hidrogênio. Na Seção 4, são detalhados os aspectos metodológicos e os dados utilizados, tomando como referência os Complexos Chafariz e Luzia, empregados como exemplo de plantas reais para estimativas de custo nivelado de hidrogênio [LCOH]. A Seção 5 analisa os resultados obtidos, discutindo a viabilidade técnica e econômica dos projetos, bem como os desafios regulatórios enfrentados. Por fim, a Seção 6 apresenta as conclusões do estudo, reforçando as oportunidades do Brasil no mercado global de hidrogênio verde e propondo recomendações para avanços regulatórios e estratégicos.

## Referência teórica

Nesta seção, será abordado o papel do hidrogênio verde no setor energético, com foco nas suas implicações para a transição energética global e as oportunidades para o Brasil. Serão discutidas as perspectivas de crescimento desse mercado, os avanços tecnológicos necessários para sua expansão e os desafios econômicos e regulatórios envolvidos na sua produção e utilização. Além disso, serão exploradas as possíveis contribuições do hidrogênio verde para a diversificação da matriz energética e a descarbonização de setores industriais estratégicos.

## Hidrogênio Verde e o Setor Energético

O hidrogênio verde representa uma solução disruptiva e estratégica para o setor energético global, principalmente no contexto de transição energética e descarbonização das economias [Lima, 2023; Oliveira, 2020; Pereira; Santos, Abreu, 2024]. O hidrogênio verde é obtido por meio da eletrólise da água, realizada com o uso de energia proveniente de fontes renováveis [Silva; Fujimoto Júnior; Abreu, 2026]. Em contrapartida, o hidrogênio cinza é produzido a partir de recursos fósseis, diferindo do hidrogênio azul, cuja geração envolve processos de captura e armazenamento de carbono [Abreu; Santos; Santos; Oda, 2024; Gabrielli e Tokarski, 2024].

O mercado global do hidrogênio verde apresenta perspectivas promissoras. Atualmente, apenas 1% do hidrogênio produzido mundialmente é classificado como verde. No entanto, projeções indicam um crescimento significativo, com investimentos em escala global, como os US\$ 73 bilhões anunciados em 2023 por 25 países para produção e infraestrutura de hidrogênio verde [Fernandes; Azevedo; Ayello; Gonçalves, 2023]. O Brasil, com uma matriz elétrica composta por mais de 87% de fontes renováveis [Alencar, 2022; Brasil, 2024b], tem potencial para se tornar um dos principais fornecedores de hidrogênio verde para o mercado internacional, aproveitando sua capacidade eólica e solar e as condições competitivas de exportação.

A relevância do hidrogênio verde vai além de sua produção; ele pode ser utilizado como combustível em indústrias de difícil eletrificação, como a siderurgia, além de servir como vetor energético para armazenamento de energia em sistemas renováveis intermitentes. Além da vantagem ambiental, o hidrogênio verde representa uma resposta à necessidade de armazenar energia renovável em larga escala, dada sua capacidade de ser estocado e transportado em diferentes vetores. A recente regulamentação brasileira reforça esse papel estratégico ao reconhecer, na Lei 14.948/2024, que o hidrogênio deve ser considerado insumo energético prioritário para a transição energética nacional. Essa mudança de paradigma aponta para o hidrogênio não apenas como solução futura, mas como ativo energético presente na formulação de políticas públicas.

## Projetos Híbridos Eólico-Solares

Os projetos híbridos, que combinam geração eólica e solar, têm se destacado como uma solução inovadora para otimizar a geração renovável. Esses sistemas aproveitam a complementariedade temporal entre as duas fontes: enquanto a energia eólica atinge sua produção máxima no período noturno e em estações mais frias, a energia solar é mais intensa durante o dia e em períodos quentes [Alencar, 2022].

Do ponto de vista técnico, a integração de projetos híbridos no sistema elétrico reduz a variabilidade da geração renovável, permitindo maior estabilidade e previsibilidade na oferta de energia. Além disso, esses projetos apresentam custos de infraestrutura reduzidos, ao compartilharem subestações e linhas de transmissão. Dados do Operador Nacional do Sistema [ONS, 2020] indicam que a complementariedade entre essas fontes pode alcançar um índice de 70%, garantindo maior eficiência operacional.

No Brasil, projetos associados têm demonstrado a viabilidade da integração eólico-solar, aproveitando a complementariedade natural entre essas fontes. Essas experiências têm evidenciado que a diversificação de fontes em uma única planta reduz custos de operação e manutenção, além de aumentar a capacidade instalada para atender à crescente demanda por energia renovável.

## Regulamentação Aplicável no Brasil

A regulação é um dos pilares fundamentais para viabilizar o avanço de projetos híbridos e da produção de hidrogênio verde no Brasil. A Resolução Normativa (REN) nº 482/2012, juntamente com suas atualizações pelas REN nº 1.000/2021 e nº 954/2021, estabeleceu marcos regulatórios fundamentais para a geração distribuída e para os projetos híbridos. Essas normas disciplinam aspectos como o compartilhamento de infraestrutura e a gestão integrada de múltiplas fontes, possibilitando que os consumidores produzam a própria energia e compensem eventuais excedentes. Ademais, as diretrizes destinadas aos projetos híbridos foram ampliadas, abrangendo parâmetros adicionais relacionados à integração e ao uso conjunto de diferentes fontes energéticas [ANEEL, 2023; Santos; Luna; Cunha; Silva; Torres, 2017].

Além disso, a Lei 14.120/2021 introduziu incentivos fiscais e diretrizes para projetos de hidrogênio verde, alinhando-se às metas climáticas do Acordo de Paris. O Brasil também conta com iniciativas de pesquisa e desenvolvimento (P&D), como as conduzidas pelo CEPEL e pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), que avaliam as melhores configurações para plantas híbridas e eletrolisadores.

A participação de instituições internacionais, como a *Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit* (GIZ) que é uma empresa de utilidade pública do Governo da República Federal da Alemanha com atuação voltada à cooperação internacional para o desenvolvimento sustentável, reforça a importância de estabelecer um marco regulatório robusto e compatível com padrões internacionais de certificação. A certificação do hidrogênio verde, conforme discutido por Gabrielli e Tokarski [2024], será essencial para assegurar a rastreabilidade e credibilidade do produto no mercado internacional.

O Brasil iniciou a construção de um arcabouço legal para o hidrogênio a partir de resoluções normativas e políticas setoriais, como a REN 954/2021 da ANEEL, que regulamenta usinas híbridas com compartilhamento de infraestrutura. No entanto, foi apenas em 2024, com a sanção da Lei nº 14.948, que o país estruturou uma base legal abrangente. A nova legislação institui o Rehidro (Regime Especial de Incentivos para Produção de Hidrogênio), promove incentivos fiscais e creditícios, e define mecanismos para integração do H<sub>2</sub> na matriz energética. O alinhamento entre ANEEL, ANP e MME permite a criação de uma governança regulatória integrada, condição essencial para atração de investimentos internacionais e para a ampliação da base produtiva de eletrolisadores, equipamentos e serviços correlatos.

## Impactos Ambientais e Econômicos

A produção de hidrogênio verde e a adoção de projetos híbridos têm impactos significativos nos âmbitos ambiental, social e econômico. Do ponto de vista ambiental, essas tecnologias contribuem para a mitigação das emissões de gases de efeito estufa (GEE), reduzindo a dependência de combustíveis fósseis e minimizando impactos negativos em comparação com hidrelétricas e térmicas.

No aspecto econômico, o hidrogênio pode abrir frentes de exportação para o Brasil, especialmente para mercados como a União Europeia, que busca diversificar suas fontes de energia e reduzir a dependência do gás natural russo. Estudos indicam que o mercado global de hidrogênio verde poderá movimentar até US\$ 10 bilhões até o final da década [Chiappini, 2023]. Embora o custo de produção do hidrogênio verde ainda seja elevado, variando entre US\$ 5 e US\$ 7 por quilograma, os avanços tecnológicos em eletrolisadores em larga escala e a queda no custo da

energia renovável podem tornar o hidrogênio competitivo em um horizonte de médio prazo [Chiappini, 2021]. A integração de plantas híbridas em projetos de hidrogênio verde também representa uma oportunidade de reduzir custos operacionais, aumentando a viabilidade econômica.

## Metodologia

A elaboração deste estudo foi conduzida com uma abordagem metodológica robusta e interdisciplinar, combinando revisão bibliográfica, análise de dados estatísticos e simulações técnico-econômicas. O objetivo foi compreender, estruturar e analisar o potencial de projetos híbridos eólico-solares para a produção de hidrogênio verde no Brasil, com foco no aproveitamento eficiente dos recursos naturais e na exploração de incentivos regulatórios.

## Método de Pesquisa

Este estudo se fundamentou em uma revisão bibliográfica extensa, utilizando relatórios e documentos técnicos de instituições brasileiras de reconhecida relevância, como a EPE [Empresa de Pesquisa Energética], MME [Ministério de Minas e Energia], ANEEL [Agência Nacional de Energia Elétrica], ONS [Operador Nacional do Sistema Elétrico] e ABEEólica [Associação Brasileira de Energia Eólica].

A revisão bibliográfica foi realizada entre os meses de outubro de 2023 e janeiro de 2024, com base em artigos científicos e publicações técnicas acessadas por meio das plataformas Google Acadêmico, SciELO, IEEE Xplore Digital Library. Foram utilizadas palavras-chave como “hidrogênio verde”, “projetos híbridos eólicos-solares”, “complementariedade energética” e “produção de hidrogênio via eletrólise”, com o uso de operadores booleanos [AND, OR] para refinamento. A seleção dos artigos foi feita individualmente, com base em critérios de qualidade, aplicabilidade ao contexto brasileiro. Embora não tenha sido aplicada uma revisão sistemática formal, foi realizado um processo estruturado de curadoria, que resultou na seleção de 14 referências principais utilizadas na fundamentação teórica. Os principais marcos regulatórios analisados incluem as Resoluções REN 482, REN 1.000 e REN 1.071, a Medida Provisória 1.212, e a Lei 14.120, que oferece incentivos para energias renováveis e tecnologias emergentes.

Além da literatura, foi realizada uma análise estatística detalhada de séries temporais de geração elétrica fornecidas pelo ONS. Os dados utilizados foram provenientes de parques híbridos na região nordeste do Brasil, com capacidade instalada combinada de mais de 589 MW. Essa análise buscou identificar complementariedades sazonais e horárias entre as fontes eólica e solar, otimizando a integração com a produção de hidrogênio verde por meio de eletrólise.

## Modelo Aplicado para Dimensionamento

O modelo considerado adota um projeto híbrido eólico-solar no semiárido nordestino, mais especificamente na Paraíba, uma região conhecida por seus elevados índices de insolação e ventos constantes. Este projeto foi definido com os seguintes parâmetros:

- Capacidade instalada total: 471,24 MW de energia eólica e 117,864 MW de energia solar.
- Tecnologia de eletrólise: Eletrólise da água alimentada exclusivamente por fontes renováveis, com eficiência entre 65% e 70%.
- Infraestrutura existente: Integração ao PAC [Plano de Ação Climática] e proximidade de subestações para redução de custos de transmissão.
- Períodos de geração analisados: séries temporais de geração elétrica analisadas para o período de dois anos [novembro de 2022 a novembro de 2024] retiradas do *site* do ONS.

Essas características possibilitam uma análise realista do potencial técnico e econômico do projeto, servindo como base para o dimensionamento de eletrolisadores e estimativa de produção de hidrogênio verde.

Quanto ao mapeamento dos desafios e oportunidades regulatórias, a abordagem metodológica incluiu uma revisão bibliográfica direcionada, com foco em relatórios técnicos e normativos emitidos por órgãos como ANEEL, MME e EPE, identificando-se lacunas regulatórias e possibilidades de aprimoramento com base em boas práticas internacionais.

## Ferramentas Analíticas

As análises técnicas e econômicas deste estudo foram realizadas com o suporte de ferramentas computacionais, como *Excel* e *PowerBI*. Essas ferramentas permitiram integrar e tratar dados complexos de geração elétrica, garantindo maior precisão na modelagem econômico-financeira e na avaliação de viabilidade do projeto híbrido voltado à produção de hidrogênio verde.

Inicialmente, foram analisadas as medianas de produção energética das fontes renováveis associadas [eólica e solar], correspondentes ao P50 da produção estimada para o parque híbrido. Esses dados fornecem uma previsão robusta e confiável da geração média esperada, possibilitando a projeção dos perfis horários e mensais de energia. O custo médio da energia produzida [US\$/MWh] pelos parques foi estimado com base nos dados fornecidos nas referências [Abreu; Pereira; Proença; Toniolo; Santos, 2023], viabilizando a aplicação de métricas reconhecidas na literatura técnica e econômica, como:

1. LCOE [*Levelized Cost of Energy*]: Cálculo do custo nivelado de energia, considerando os investimentos iniciais [CAPEX], custos operacionais recorrentes [OPEX] e a vida útil esperada dos equipamentos instalados. Esse indicador reflete a competitividade econômica dos projetos híbridos. Seu cálculo é dado pela [Equação 1](#).

$$COE = \frac{CAPEX + \sum_{t=1}^T \frac{OPEX}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^T \frac{Energia\ Gerada\ Anual}{(1+r)^t}} \quad [Eq. 1]$$

Onde:

- CAPEX: Investimento inicial [US\$ 900 milhões].
- OPEX: Custos operacionais anuais [US\$ 20 milhões].
- ROI: Taxa de desconto.
- TTT: Vida útil do projeto [25 anos].



2. LCOH [*Levelized Cost of Hydrogen*]: Determinação do custo nivelado para a produção de hidrogênio verde, incluindo o custo da energia utilizada para alimentar os eletrolisadores e a eficiência dos equipamentos [estimada entre 65% e 70%]. Seu cálculo é dado pela [Equação 2](#).

$$LCOH = \frac{\text{Custo de Energia} + \text{Custos de Eletrolisadores}}{\text{Produção Anual de Hidrogênio (kg)}} \quad [\text{Eq. 2}]$$

Resultados:

- LCOE eólico: US\$ 40/MWh.
- LCOE solar: US\$ 45/MWh.
- LCOH estimado: US\$ 2,70/kg.

3. ROI [*Return on Investment*]: Projeção da taxa de retorno do investimento, levando em conta incentivos fiscais, subsídios e benefícios ambientais decorrentes da descarbonização promovida pelos projetos. Seu cálculo é dado pela [Equação 3](#).

$$ROI = \frac{\text{Investimento inicial}}{\text{Lucro Líquido}} \quad [\text{Eq. 3}]$$

O ROI projetado foi de 14%, considerando incentivos fiscais da Lei 14.120 e créditos de carbono. Em [Lefosse \(2024a\)](#), Camila Ramos defende que a inserção disruptiva das BESS [Battery Energy Storage Systems] reguladas e subsidiadas no Brasil será um marco técnico crucial para viabilizar a produção de hidrogênio verde em larga escala. Essas tecnologias de armazenamento permitirão alcançar perfis mais "flat" de geração de energia, otimizando a operação de grandes eletrolisadores e aumentando a previsibilidade na produção de hidrogênio verde. A integração das BESS, quando associada a projetos híbridos eólico-solares, promove uma maior estabilidade no fornecimento energético, garantindo eficiência e confiabilidade mesmo diante das variações naturais das fontes renováveis.

Além disso, as variáveis críticas para análise de viabilidade econômica e técnica foram extraídas de [Abreu, Pereira, Proença, Toniolo e Santos \(2023\)](#), garantindo uma fundamentação sólida nos cálculos e projeções deste estudo. O alinhamento dessas variáveis com os incentivos previstos no marco regulatório brasileiro, como resoluções da ANEEL, reforça a competitividade dos projetos no contexto nacional e internacional.

Por fim, esta metodologia analítica apresenta um panorama robusto para subsidiar decisões estratégicas na implementação de projetos híbridos e na produção de hidrogênio verde no Brasil. A combinação de ferramentas computacionais, indicadores econômicos e avanços tecnológicos como as BESS consolida o caminho para que o país se torne um dos líderes globais no mercado de hidrogênio sustentável.



Limitações do Estudo

Este trabalho se concentra em aspectos técnicos e econômicos, deixando para investigações futuras análises de impacto social, viabilidade de exportação e questões logísticas associadas ao transporte de hidrogênio verde.

Resultados do Modelo Proposto

Nesta seção, será apresentada a descrição detalhada do projeto de geração híbrida e produção de hidrogênio verde, que combina energia eólica e solar em uma iniciativa localizada na Paraíba. O projeto abrange uma capacidade instalada total de 589,14 MW, sendo 471,24 MW provenientes da geração eólica e 117,864 MW de energia solar, com o objetivo de integrar essas fontes renováveis de maneira complementar para otimizar a produção contínua de hidrogênio. A análise incluirá dados sobre a capacidade dos parques envolvidos, a dinâmica de complementariedade entre as fontes eólica e solar, além das estimativas de viabilidade econômica, impactos ambientais e potenciais de exportação. A descrição também abordará os benefícios para o Brasil, com destaque para as oportunidades de se consolidar como líder no mercado global de hidrogênio verde.

Descrição do Projeto

O projeto estudado é composto por 471,24 MW de capacidade eólica [parques Chafariz 1 a 7, Ventos de Arapuá 1 a 3, Canoas 2, Canoas 4, Lagoa 3 e Lagoa 4] e 117,864 MW de capacidade solar [parques Luzia 2 e 3] [Tabela 1], ambos localizados na Paraíba. A complementariedade entre as fontes solar e eólica permite uma operação contínua de hidrogênio, especialmente se acompanhada de um conjunto de baterias. A região semiárida apresenta condições ideais para esse projeto devido à abundância de recursos renováveis e à proximidade de infraestrutura de transmissão existente, reduzindo os custos de conexão ao sistema elétrico.

Tabela 1. Dados dos Parques Eólicos e Solares do modelo de referência

Parque	Capacidade [MW]	Fonte
Chafariz 1-7	239,085	Eólica
Ventos de Arapuá 1 a 3	72,765	Eólica
Canoas 2 a 4	103,950	Eólica
Lagoa 3 e 4	55,440	Eólica
Luzia 2-3	117,864	Solar
Total	589,14	Associado

Fonte: Elaboração própria [2025]

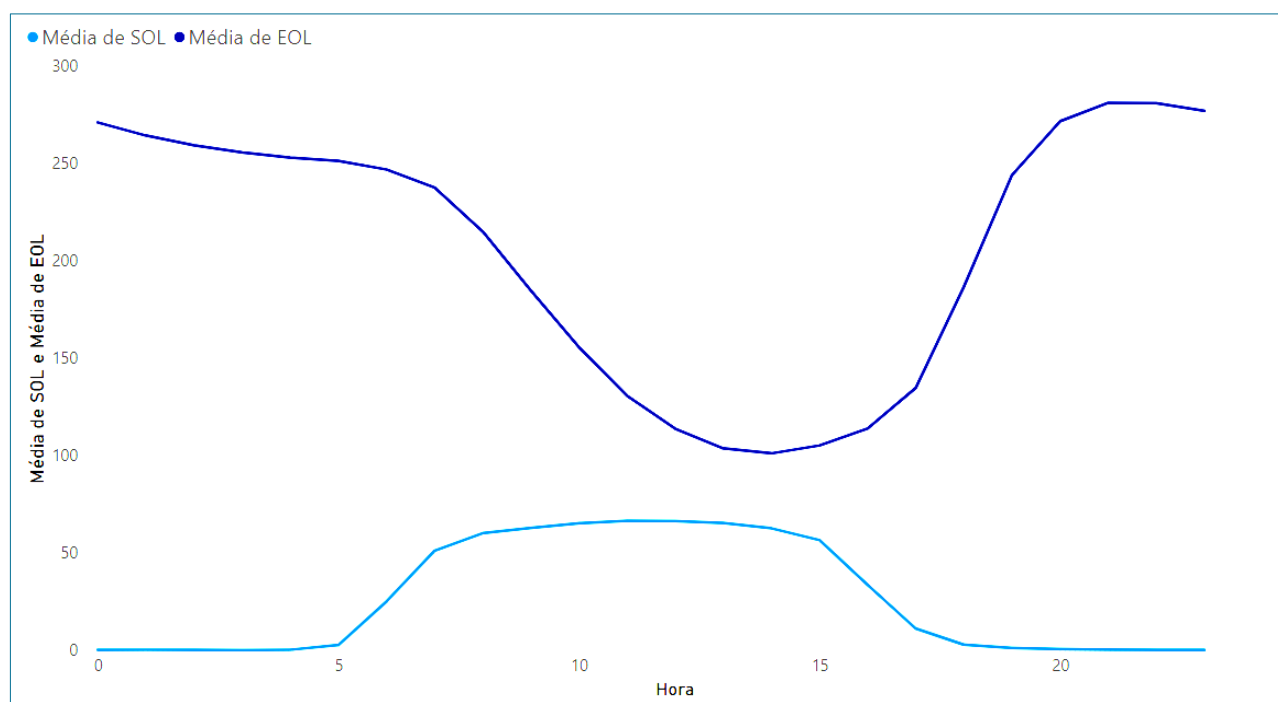
Perfis de Geração e Complementariedade

A análise dos dados de geração revelou uma forte complementariedade entre as fontes solar e eólica, considerando os dados de operação retirados do ONS, para período compreendido entre novembro de 2022 até novembro de 2024, em que ressaltam as seguintes características de produção horária:

- Solar: Geração máxima durante o dia, especialmente no verão.
- Eólica: Produção intensificada à noite e durante os meses de inverno.

Essa complementariedade é representada na [Figura 1](#), que apresenta as curvas médias de geração horária ao longo do dia. A linha azul escura indica a geração solar, evidenciando sua predominância entre o final da manhã e o início da tarde. Já a linha azul clara mostra a geração eólica, com destaque para sua atuação durante a madrugada e no início da manhã, justamente quando a geração solar é inexistente ou reduzida.

Figura 1. Complementariedade Horária [Produção Solar x Eólica - Média MW/h]

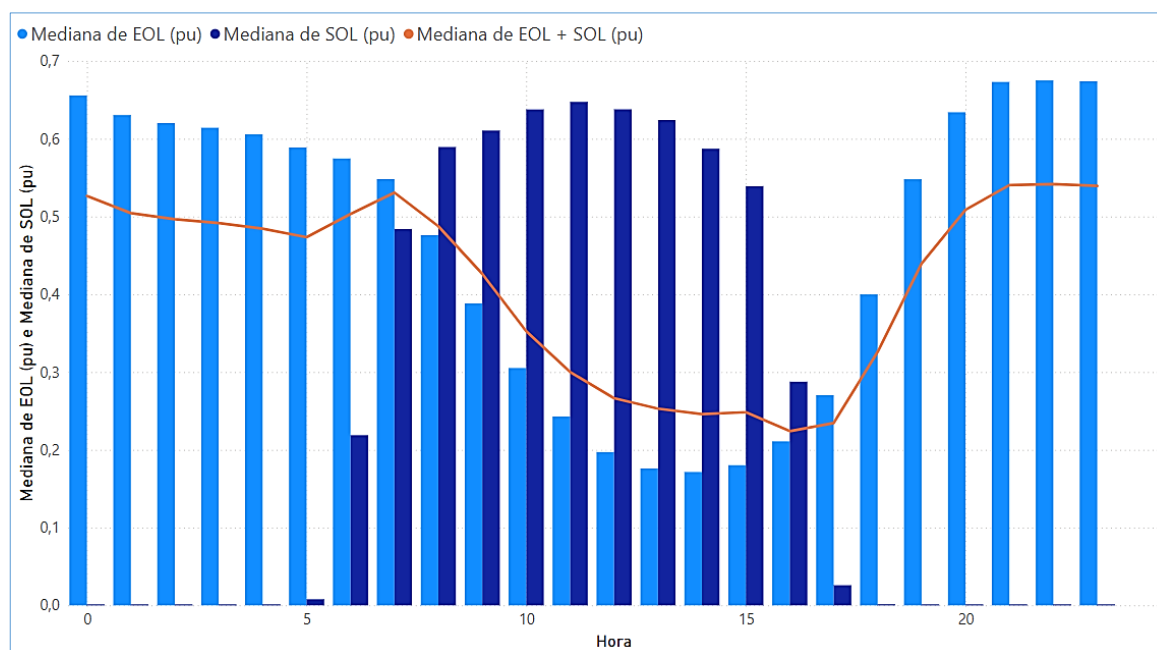


Fonte: Elaboração própria (2025)

No modelo considerado, a proporção entre a capacidade instalada das fontes renováveis é de 80% para a eólica e 20% para a solar. Essa alternância natural entre as fontes reduz a intermitência da geração total, promovendo um perfil mais equilibrado ao longo das 24 horas.

Na [Figura 2](#), observa-se a produção simultânea das fontes solar e eólica ao longo do dia, com base na mediana horária. Os dados ilustram claramente a dinâmica de complementariedade: durante a madrugada e as primeiras horas da manhã, a geração eólica mostra-se dominante, preenchendo a lacuna deixada pela ausência da energia solar. A partir do final da manhã, a geração solar cresce significativamente e passa a contribuir majoritariamente até o final da tarde, momento em que a eólica retoma sua dominância.

Figura 2. As duas fontes [eólica e solar] operando juntas, em mediana horária



Fonte: Elaboração própria [2025]

Essa alternância entre as fontes é crucial para garantir maior estabilidade no fornecimento de energia, especialmente em projetos híbridos que visam a alimentar eletrolisadores com perfis mais uniformes de geração.

### Estimativas de Viabilidade Econômica

Os resultados dos cálculos indicam que o projeto possui alta viabilidade econômica, com os seguintes parâmetros:

- CAPEX total estimado: US\$ 900 milhões [US\$ 1.200/kW para eólica, US\$ 800/kW para solar, US\$ 500/kW para eletrolisadores];
- OPEX anual estimado: US\$ 20 milhões;
- Produção anual de hidrogênio: 15.000 toneladas [com eficiência de 65% dos eletrolisadores];
- LCOH estimado: US\$ 2,70/kg;
- ROI projetado: 14%, considerando incentivos fiscais da Lei 14.120 e créditos de carbono.

Os incentivos regulatórios e fiscais são fundamentais para alcançar uma competitividade global, especialmente em mercados como União Europeia e Japão, que têm alta demanda por hidrogênio verde. Por isso, a grande importância de subsídios para que o Brasil se torne um grande *player* global na produção de hidrogênio produzido a partir de fontes renováveis.

### Impactos Ambientais e Econômicos

O projeto apresenta benefícios ambientais significativos, com potencial para evitar a emissão de mais de 180 mil toneladas de CO<sub>2</sub> por ano, comparado a fontes fósseis. Além disso, O Brasil pode se consolidar como fornecedor estratégico de hidrogênio verde, com a exportação; e gerar 2,5 mil empregos diretos durante a construção e 500 durante a operação.

## Modelo de Referência [planta de Hidrogênio da Eletrobras]

A análise avalia a integração de projetos híbridos de geração renovável e a produção de hidrogênio verde no Brasil. Além dos Complexos Chafariz e Luzia [totalizando 589,104 MW de capacidade instalada], inclui-se nesta Seção a planta piloto de hidrogênio verde da Eletrobras, localizada em Itumbiara (GO), que serve como referência prática de viabilidade técnica e operacional para projetos futuros. A planta de hidrogênio da Eletrobras utiliza energia renovável produzida pela Usina Hidrelétrica de Itumbiara para alimentar sistemas de eletrólise. Este projeto piloto representa um marco no Brasil e exemplifica a aplicação de hidrogênio verde no setor elétrico.

A integração das fontes eólica e solar, juntamente com tecnologias de armazenamento de energia e incentivos regulatórios, cria um modelo robusto para atender à demanda crescente por energia limpa e descarbonizada, além de abrir espaço para o Brasil se consolidar como um *player* estratégico no mercado global de hidrogênio verde.

Nesse contexto, destaca-se que a planta piloto da Eletrobras, localizada em Itumbiara (GO), utiliza energia renovável proveniente de fonte hidrelétrica e possui uma capacidade instalada de 10 MW, sendo capaz de produzir anualmente cerca de 2 mil toneladas de hidrogênio verde. Com base no projeto piloto, estima-se que a integração das plantas eólicas e solares possibilite a produção anual de aproximadamente 15 mil toneladas de hidrogênio verde, utilizando exclusivamente essas fontes renováveis.

## Conclusão da Análise

Os resultados mostram que projetos híbridos eólico-solares têm grande potencial para atender à crescente demanda por hidrogênio verde, alinhando-se às metas de descarbonização. A complementariedade entre as fontes e os incentivos regulatórios tornam esses projetos economicamente atraentes e ambientalmente sustentáveis.

A análise de viabilidade técnica e econômica baseou-se na estimativa da produção energética das fontes associadas e na aplicação de métricas reconhecidas internacionalmente. Foram utilizados os seguintes indicadores: LCOE, que considera o investimento inicial [CAPEX], os custos operacionais anuais [OPEX] e a vida útil do projeto [25 anos]; LCOH, calculado a partir do custo da energia e do investimento nos eletrolisadores; ROI, representando a taxa de retorno do capital investido.

Com base nos parâmetros do projeto — incluindo uma capacidade instalada de 589,104 MW e uma produção anual estimada de 15 mil toneladas de hidrogênio verde — foram obtidos os seguintes resultados: LCOE eólico, US\$ 40/MWh; LCOE solar, US\$ 45/MWh; LCOH estimado, US\$ 2,70/kg; ROI projetado, 14%, considerando incentivos fiscais da Lei 14.120 e créditos de carbono.

Do ponto de vista ambiental e socioeconômico, os impactos estimados reforçam a relevância da iniciativa: a substituição de combustíveis fósseis por hidrogênio verde poderia evitar a emissão de aproximadamente 180 mil toneladas de CO<sub>2</sub> por ano, além de gerar cerca de 2,5 mil empregos diretos na fase de construção e 500 durante a operação. Também se destaca o potencial de exportação, com foco em mercados estratégicos como União Europeia e Japão.

Por fim, a inclusão da planta piloto da Eletrobras, localizada em Itumbiara (GO), contribui para validar a viabilidade operacional desses projetos, ao demonstrar na prática a aplicação de tecnologias de eletrólise alimentadas por fontes renováveis. O conjunto de resultados evidencia que, ao integrar eólica, solar e armazenamento de energia, o Brasil pode consolidar-se como um protagonista no mercado global de hidrogênio verde, desde que continue avançando em sua regulação e políticas de incentivo.

## Discussão dos resultados

Esta seção analisa os resultados obtidos no modelo de referência, integrando-os ao contexto regulatório e econômico do setor energético brasileiro. A discussão incorpora a relevância de iniciativas como o Complexo Renovável da Neoenergia, outorgado pela ANEEL, e explora o impacto da complementariedade entre fontes renováveis para a produção de hidrogênio verde. São apresentadas as principais barreiras, oportunidades e sugestões de aprimoramento regulatório, com destaque para o potencial de replicação desse modelo em outras regiões do Brasil.

A análise confirma que a complementariedade entre fontes eólica e solar contribui para a estabilidade do sistema elétrico e melhora a eficiência da produção de hidrogênio verde. Dados dos Complexos Chafariz e Luzia evidenciam que a alternância natural entre as fontes reduz a intermitência, criando um perfil de geração mais uniforme ao longo do tempo. Essa característica é crucial para o funcionamento de eletrolisadores, garantindo operação contínua e reduzindo custos operacionais [EPE, 2019]. Os resultados anteriores demonstram como essa complementariedade é maximizada em regiões do Nordeste brasileiro, onde recursos renováveis são abundantes e bem distribuídos sazonalmente. Essa estabilidade reforça o papel dos projetos híbridos na transição energética nacional.

## Complementariedade das Fontes e Estabilidade do Sistema Elétrico

A complementariedade entre as fontes eólica e solar é destacada no modelo de referência. Os dados dos Complexos Chafariz [eólico] e Luzia [solar] demonstram que, quando associados, essas fontes conseguem alcançar um perfil de geração mais estável, contribuindo significativamente para a segurança energética e a eficiência operacional. No entanto, para garantir o funcionamento contínuo e em larga escala de uma planta de produção de hidrogênio verde, torna-se essencial a integração de sistemas de armazenamento de energia, como baterias subsidiadas.

Esses sistemas são fundamentais para reduzir significativamente a intermitência, especialmente com o suporte de sistemas de armazenamento de energia. A utilização de baterias não apenas estabiliza o fornecimento de energia para sistemas de eletrólise, que exigem uma alimentação constante, mas também potencializa o impacto econômico e ambiental dos projetos híbridos, consolidando o hidrogênio verde como uma solução viável e competitiva em nível global. O estudo destaca que a complementariedade entre fontes renováveis é essencial para garantir estabilidade na produção de hidrogênio verde. Essa estabilidade reduz a intermitência e assegura operação eficiente dos eletrolisadores.

## Custos de Produção e Competitividade no Mercado Internacional e Modelos Econômicos

Os custos calculados para os projetos híbridos e para a produção de hidrogênio verde indicam forte competitividade no mercado internacional, especialmente com a aplicação de incentivos fiscais. Os resultados mais relevantes incluem LCOE - Custo nivelado de energia em US\$ 40/MWh para geração eólica e US\$ 45/MWh para solar; e LCOH - Custo nivelado de produção de hidrogênio em US\$ 2,70/kg, considerando eficiência de 65% a 70% nos eletrolisadores e incentivos regulatórios.

Os modelos econômicos revelaram LCOE médio de US\$ 42,5/MWh; LCOH competitivo em US\$ 2,70/kg; e ROI de 14%. Esses valores são competitivos globalmente, mas dependem de incentivos e subsídios governamentais. Esses valores colocam o Brasil em posição estratégica para atender à crescente demanda por hidrogênio verde, especialmente em mercados como União Europeia e Japão, que buscam alternativas de descarbonização. Além disso, a exportação de hidrogênio verde pode se tornar um importante vetor econômico para o país, gerando receita e atraindo investimentos.

Os custos nivelados de energia (LCOE) e hidrogênio (LCOH) indicam que o Brasil possui condições competitivas no mercado global. O LCOH de US\$ 2,70/kg, por exemplo, destaca o potencial do país para atender à crescente demanda por hidrogênio verde em mercados como União Europeia e Japão [ABEEólica, 2024].

No entanto, a ausência de um arcabouço regulatório robusto representa um risco significativo para investidores. Apesar dos avanços, como as REN nº 1.071/2023 e nº 954/2021 da ANEEL, ainda faltam instrumentos jurídicos claros que garantam segurança regulatória e financeira para projetos de grande escala [ANEEL, 2023]. Essa lacuna desincentiva investimentos estrangeiros e impede que o Brasil atinja todo seu potencial como exportador de hidrogênio verde.

### Impactos Regulatórios [barreiras e oportunidades no Brasil]

O marco regulatório brasileiro tem apresentado avanços significativos para fomentar a integração de fontes renováveis e a produção de hidrogênio verde, mas ainda enfrenta desafios importantes. Entre as principais barreiras, destaca-se a ausência de normas específicas para a certificação de hidrogênio verde, o que dificulta o acesso aos mercados internacionais. Além disso, apesar dos progressos trazidos pela REN 954 e outras resoluções, a aprovação de usinas híbridas e associadas ainda apresenta grande complexidade. Outro ponto crítico é a necessidade de maior clareza sobre a aplicação de tarifas reduzidas (TUST) para empreendimentos que compartilham infraestrutura.

Por outro lado, há oportunidades relevantes nesse cenário. A Resolução Normativa nº 954 da ANEEL, por exemplo, regulamenta a operação de usinas híbridas e associadas, como os Complexos Chafariz e Luzia, permitindo maior flexibilidade na operação e no planejamento desses empreendimentos. O compartilhamento de infraestrutura também desponta como uma estratégia promissora, pois reduz custos operacionais e investimentos em novas linhas de transmissão, tornando os projetos mais atrativos economicamente.

Apesar dos avanços com a REN nº 1.071/2023 e recente aprovação da Lei nº 14.948/2024, há necessidade de: certificação clara de hidrogênio verde; subsídios para baterias e CAPEX de eletrolisadores; e planos e projetos estratégicos nacionais.

### Propostas de Aprimoramento

Para consolidar o Brasil como líder no mercado de hidrogênio verde, é essencial implementar um programa nacional para certificação de hidrogênio verde, alinhado aos padrões internacionais; aumentar os subsídios e incentivos fiscais para CAPEX e OPEX de projetos híbridos e de hidrogênio verde; e ampliar programas de P&D voltados para tecnologias de eletrólise e armazenamento, com foco em redução de custos e aumento da eficiência.

A análise regulatória revelou que, embora o Brasil tenha avançado em resoluções importantes, como a REN nº 1.071/2023 e a Portaria nº 79/2024, ainda há desafios

significativos. A falta de normas específicas para certificação e rastreabilidade do hidrogênio verde é um dos principais gargalos. Isso dificulta o acesso aos mercados internacionais e reduz a confiança dos *stakeholders* [Lefosse, 2024a, 2024b].

Além disso, incentivos fiscais existentes são insuficientes para cobrir o alto CAPEX dos projetos híbridos e de hidrogênio verde. Países como Alemanha e Austrália, que lideram o mercado global, oferecem subsídios diretos e financiamento de longo prazo para seus projetos, destacando a necessidade de o Brasil adaptar e expandir seus programas de incentivo [Abreu; Coralli; Proença; Santos, 2023].

A promulgação da Lei nº 14.948/2024 representa um divisor de águas na regulação do setor, ao consolidar o hidrogênio como vetor energético oficialmente reconhecido. A legislação também contribui para dirimir incertezas jurídicas que desestimulam investidores, ao criar instrumentos de apoio ao desenvolvimento tecnológico e à cadeia produtiva. Além disso, ela estabelece requisitos para rastreabilidade e sustentabilidade da produção, permitindo futura adesão do Brasil aos mercados de hidrogênio certificado, como os da União Europeia.

### Experiências do Complexo Renovável Analisado

A Aprovação pela ANEEL da associação entre os Complexos Chafariz e Luzia representa um marco significativo para o setor elétrico brasileiro e uma referência para a integração de fontes renováveis. Este projeto pioneiro demonstrou que é possível combinar eficiência operacional e benefícios ambientais em larga escala, especialmente quando complementado por sistemas de armazenamento de energia, como baterias subsidiadas, que são essenciais para viabilizar o funcionamento contínuo de plantas de produção de hidrogênio verde.

- **Eficiência Operacional:** O compartilhamento da infraestrutura de transmissão (subestação Neoenergia Santa Luzia II) reduz os custos de conexão ao sistema elétrico e otimiza o uso da rede, promovendo maior estabilidade na geração de energia. Além disso, o uso de baterias subsidiadas seria estratégico para suavizar a intermitência das fontes renováveis, garantindo um fornecimento constante para alimentar eletrolisadores com eficiência máxima.

- **Sustentabilidade:** Com uma capacidade instalada total de 589,104 MW, o complexo é capaz de abastecer mais de 1,3 milhão de residências por ano, evitando a emissão de mais de 100 mil toneladas de CO<sub>2</sub>. A inclusão de sistemas de armazenamento reforça ainda mais a sustentabilidade do projeto, permitindo uma curva de geração mais estável e reduzindo desperdícios energéticos.

- **Replicação do Modelo:** O modelo adotado pela Neoenergia serve como exemplo para futuros empreendimentos, demonstrando que a integração de fontes renováveis associadas a baterias subsidiadas é eficiente, sustentável e economicamente viável. Essa abordagem não apenas otimiza a infraestrutura existente, mas também cria as condições necessárias para o avanço do hidrogênio verde em larga escala, posicionando o Brasil como um dos líderes globais na transição energética.

O Complexo Renovável da Neoenergia exemplifica como a associação de usinas híbridas pode ser uma solução eficiente e sustentável. Com capacidade instalada total de 589 MW, o projeto reduz custos de transmissão por meio do compartilhamento de infraestrutura, demonstrando um modelo replicável para outros empreendimentos no país [Lefosse, 2024a, 2024b]. Contudo, a replicação desse modelo depende diretamente de um ambiente regulatório mais favorável. É essencial que o Brasil ofereça segurança jurídica e incentivos robustos para atrair os primeiros investidores internacionais, estabelecendo um precedente positivo para o setor.



Integração com Modelos da Eletrobras

A planta piloto da Eletrobras demonstra que projetos híbridos podem ser replicados em larga escala, especialmente com incentivos que reduzam o custo de tecnologias como armazenamento e eletrolisadores.

Comparação com Experiências Internacionais

A análise dos marcos regulatórios de países como Alemanha e Austrália mostra que há espaço para o Brasil adaptar e melhorar suas políticas:

- Alemanha: Estratégia nacional de hidrogênio com financiamento de longo prazo e subsídios diretos para projetos;
- Austrália: Criação de *hubs* regionais para produção e exportação de hidrogênio, com forte suporte governamental.

Essas iniciativas oferecem lições importantes, como a necessidade de um plano integrado e incentivos direcionados, que podem ser replicados no contexto brasileiro. Ambos os países criaram planos nacionais com subsídios significativos e estratégias de exportação bem definidas. No Brasil, a ausência de um plano integrado e a fragmentação dos esforços regulatórios dificultam o avanço do setor [Lefosse, 2024a, 2024b].

Desafios e Oportunidades

O estudo identificou desafios e oportunidades no contexto do hidrogênio verde no Brasil. Entre os principais desafios, destacam-se os apresentados no Quadro 1. Nele, nota-se que é importante considerar o custo elevado de tecnologias essenciais, como eletrolisadores e sistemas de armazenamento [Abreu; Pereira; Proença; Toniolo; Santos, 2023; Chiappini, 2021; Santos; Abreu, 2024], a ausência de políticas de longo prazo para suporte e desenvolvimento do setor e a dificuldade de integração ao sistema elétrico nacional, especialmente considerando a intermitência das fontes renováveis [Abreu; Santos, 2024; Alencar, 2022; Oliveira, 2020].

Quadro 1. Desafios da promoção do hidrogênio verde no Brasil

Categoria	Descrição
Tecnológica	O Brasil enfrenta altos custos de tecnologias essenciais, como eletrolisadores e sistemas de armazenamento de hidrogênio. Além disso, a operação contínua depende de soluções para mitigar a intermitência das fontes renováveis, como baterias subsidiadas, o que ainda representa um desafio em larga escala.
Regulamentar	Há ausência de políticas de longo prazo que garantam estabilidade e incentivo ao setor. A regulamentação infralegal precisa ser mais célere e coordenada, os mecanismos de certificação ainda carecem de normalização técnica, e os leilões de hidrogênio estão em fase inicial, dificultando a atração de investimentos.
Integração Energética	A intermitência natural de fontes solar e eólica gera dificuldade na integração ao sistema elétrico nacional. Garantir estabilidade na geração e atender à demanda contínua de eletrolisadores em larga escala é um desafio técnico e logístico relevante.
Infraestrutura	A infraestrutura necessária para produção, armazenamento e transporte de hidrogênio verde exige investimentos elevados. A falta de sistemas de armazenamento eficientes e a necessidade de adaptação da rede elétrica aumentam a complexidade do setor.
Mercado	O setor ainda enfrenta incertezas quanto à demanda nacional e internacional. Barreiras comerciais, certificação incompleta e competição com outras fontes de energia podem limitar o crescimento do mercado de hidrogênio verde.

Fonte: Elaboração própria [2025]

Por outro lado, o cenário também apresenta oportunidades promissoras [Quadro 2]. A exportação de hidrogênio verde para mercados internacionais, impulsionada pela competitividade de custos no Brasil, é uma delas. Além disso, a geração de empregos em regiões do semiárido oferece benefícios sociais e econômicos significativos, enquanto a consolidação do Brasil como líder global em energias renováveis pode impulsionar a inovação tecnológica e o desenvolvimento sustentável no país.

Quadro 2. Oportunidades da promoção do hidrogênio verde no Brasil

Categoria	Descrição
Econômica	O hidrogênio verde oferece potencial de exportação para mercados internacionais, gerando receitas significativas e fortalecendo a economia. O baixo custo de produção no Brasil torna o país competitivo frente a outros produtores globais.
Social	A produção de hidrogênio verde pode gerar empregos qualificados em regiões do semiárido, promovendo desenvolvimento local, inclusão social e oportunidades de capacitação técnica.
Tecnológica	Projetos híbridos eólico-solares, combinados com sistemas de armazenamento, possibilitam maior estabilidade energética e operação contínua de eletrolisadores. Isso estimula inovação tecnológica e desenvolvimento de soluções integradas em energia limpa.
Estratégica	O Brasil pode se consolidar como líder global em energias renováveis, aproveitando sua matriz limpa e recursos naturais abundantes. A criação de corredores verdes e acordos bilaterais com outros países pode fortalecer sua posição no mercado internacional.
Sustentabilidade	A expansão do hidrogênio verde contribui diretamente para a descarbonização da matriz energética, reduzindo emissões de gases de efeito estufa e promovendo práticas sustentáveis no setor energético nacional.

Fonte: Elaboração própria [2025]

Os projetos híbridos eólico-solares, como os Complexos Chafariz e Luzia, têm um enorme potencial para revolucionar o setor energético brasileiro, especialmente no contexto da produção de hidrogênio verde. A complementariedade das fontes renováveis, quando combinada com sistemas de armazenamento de energia, como baterias subsidiadas, garante maior estabilidade na geração e possibilita o funcionamento contínuo de eletrolisadores em larga escala. Essa integração é essencial para atender às demandas de um mercado global crescente e fortalecer o Brasil como um *player* estratégico no setor de hidrogênio verde.

Além disso, a implementação de baterias subsidiadas oferece uma solução técnica para mitigar a intermitência natural das fontes solar e eólica, assegurando um perfil de geração mais estável e contínuo ao longo do tempo, ampliando a eficiência do sistema. Para maximizar esses benefícios, é crucial superar barreiras regulatórias, reduzir custos tecnológicos e estabelecer um plano nacional integrado que inclua certificação e incentivos fiscais. Esse modelo não apenas promove a descarbonização, mas também oferece uma base sólida para o crescimento sustentável e a competitividade do Brasil no mercado global de energias renováveis e hidrogênio verde [Gabrielli; Tokarski, 2024].

Apesar dos desafios, como a necessidade de certificação e os altos custos de infraestrutura, o Brasil possui vantagens competitivas únicas. A exportação de hidrogênio verde pode gerar receitas substanciais e consolidar o país como líder global em energia limpa. No entanto, isso requer um esforço coordenado entre governo, setor privado e instituições reguladoras para superar barreiras existentes e capitalizar sobre as oportunidades [ANEEL, 2023].

Ainda que a Lei nº 14.948/2024 represente um avanço importante, há desafios remanescentes: a regulamentação infralegal precisa ser célere e coordenada entre agências; os mecanismos de certificação ainda carecem de normalização técnica e o modelo de leilões para hidrogênio ainda está em fase embrionária. Por outro lado, o alinhamento legal e institucional pode colocar o Brasil entre os principais produtores globais, principalmente se forem estabelecidos mecanismos de exportação, como corredores verdes e acordos bilaterais com a Europa e Ásia. O fortalecimento de mecanismos como o Rehidro e a priorização de projetos com geração híbrida devem ser o foco das políticas nos próximos anos.

## Considerações Finais

Este estudo teve como objetivo investigar de que forma o Brasil pode aproveitar seu potencial renovável para se consolidar como líder global na produção e exportação de hidrogênio verde. A análise se fundamentou em uma revisão da literatura técnico-científica, de documentos normativos e relatórios institucionais relevantes, conforme discutido no referencial teórico, abordando o estado da arte sobre projetos híbridos, viabilidade econômica e desafios regulatórios.

As análises técnicas demonstraram que a complementariedade entre as fontes solar e eólica resulta em uma geração mais contínua e previsível, o que é essencial para a operação eficiente de eletrolisadores. Esse modelo é ainda mais eficaz quando integrado a tecnologias de armazenamento de energia, como as BESS, conforme defendido por [Lefosse \(2024a\)](#), promovendo estabilidade no fornecimento energético e viabilizando a produção ininterrupta de hidrogênio verde.

No aspecto econômico, o estudo mostrou que o Brasil apresenta competitividade internacional, com LCOH estimado em US\$ 2,70/kg. Esse valor posiciona o país como um potencial fornecedor para mercados exigentes, como União Europeia e Japão ([ABEEólica, 2024](#)). Entretanto, foram identificados entraves significativos, especialmente a ausência de um arcabouço regulatório consolidado, barreiras à certificação do hidrogênio verde e a escassez de incentivos para projetos de grande escala.

Diante disso, destacam-se três frentes prioritárias para que o Brasil possa efetivar seu potencial: Regulação e Certificação: A recente Lei nº 14.948/2024 representa um avanço ao instituir o marco legal do hidrogênio de baixa emissão de carbono, mas sua efetividade dependerá da regulamentação detalhada que permita credibilidade internacional; Incentivos Financiamento: Programas como o REHIDRO, subsídios para baterias e eletrolisadores e a criação de *hubs* regionais de produção são medidas essenciais para viabilizar economicamente os projetos; Parcerias Estratégicas: A experiência internacional em países como Alemanha e Austrália aponta que o sucesso passa pela articulação entre setor público, iniciativa privada e cooperação internacional ([Lefosse, 2024a](#)).

Portanto, o hidrogênio verde representa não apenas uma oportunidade econômica estratégica para o Brasil, mas também uma solução para alcançar as metas climáticas estabelecidas no Acordo de Paris. A integração de fontes renováveis em projetos híbridos, conforme analisado, é uma solução viável para mitigar a intermitência e ampliar a descarbonização.

Como desdobramento futuro, recomenda-se a ampliação da revisão bibliográfica para incluir novos estudos internacionais sobre modelos regulatórios e de financiamento. Sugere-se, ainda, o aprofundamento da análise sobre impactos socioeconômicos regionais da produção de hidrogênio, especialmente no semiárido nordestino, e a inclusão de metas específicas no Plano Decenal de Expansão de Energia (PDE), consolidando o Brasil como um dos principais atores globais no mercado de hidrogênio verde.

## Referências

- ABEEÓLICA. Associação Brasileira de Energia Eólica. **Nota ABEEólica PL Hidrogênio**, 20 jun. 2024. Disponível em: <https://abeeolica.org.br/nota-abeeolica-pl-hidrogenio/>. Acesso em: out. 2025.
- ABREU, V. H. S.; CORALLI, A.; PROENÇA, L. F. C.; SANTOS, A. S. Avaliação do ciclo de vida como ferramenta para medir a eficiência ambiental do hidrogênio renovável. **IMPACT projects**, v. 2, n. 1, p. 105-122, 2023.
- ABREU, V. H. S.; PEREIRA, V. G. F.; PROENÇA, L. F. C.; TONIOLO, F. S.; SANTOS, A. S. A systematic study on techno-economic evaluation of hydrogen production. **Energies**, v. 16, n. 18, 6542, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16186542>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/16/18/6542>. Acesso em: 19 jan. 2026.
- ABREU, V. H. S.; SANTOS, A. S. Promoting a Sustainable Energy Footprint: Brazilian Initiatives for Renewable Hydrogen. //: MUTHU, S.S. [ed.] **Energy Footprint and Sustainability: Case Studies**. Cham: Springer Nature Switzerland, 2024. p. 23-36. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-031-63057-6\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-031-63057-6_3). Disponível em: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-031-63057-6>. Acesso em: 19 jan. 2026.
- ABREU, V. H. S.; SANTOS, R. F.; SANTOS, A. S.; ODA, S. The Role of Renewable Hydrogen in Achieving Sustainable Urban Transportation. **MIX Sustentável**, v. 10, n. 3, p. 163-173, 2024. DOI: <https://doi.org/10.29183/2447-3073.MIX2024.v10.n3.163-173>. Disponível em: <https://ojs.sites.ufsc.br/index.php/mixsustentavel/article/view/7268>. Acesso em: 19 jan. 2026.
- ALENCAR, F. C. **Matriz elétrica do Brasil e Ceará**: aspectos históricos e regulatórios. 2022. 47 f. Trabalho de Conclusão de Curso [Graduação em Ciências Econômicas] – Faculdade de Economia, Administração, Atuária e Contabilidade, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2022. Disponível em: [repositorio.ufc.br/handle/riufc/72506](https://repositorio.ufc.br/handle/riufc/72506). Acesso em: 19 jan. 2026.
- ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Resolução Normativa nº 954/2021**. Altera as Resoluções Normativas nº 77, de 18 de agosto de 2004, nº 247, de 21 de dezembro de 2006, nº 559, de 27 de junho de 2013, nº 583, de 22 de outubro de 2013, nº 666, de 23 de junho de 2015 e nº 876, de 10 de março de 2020, para estabelecer tratamento regulatório para a implantação de Central Geradora Híbrida (UGH) e centrais geradoras associadas. [Brasília, DF]: ANEEL, 2021. Disponível em: <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2021954.html>. Acesso em: 19 jan. 2026.
- ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Resolução Normativa nº 1.071/2023, de 29 de agosto de 2023**. Estabelece os requisitos e procedimentos necessários à obtenção de outorga de autorização e alteração da capacidade instalada de centrais geradoras Eólicas, Fotovoltaicas, Termelétricas, Híbridas e outras fontes alternativas, bem como à associação de centrais geradoras que contemplem essas tecnologias de geração, e à comunicação de implantação de centrais geradoras com capacidade instalada reduzida. [Brasília, DF]: ANEEL, 2023. Disponível em: <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren20231071.html>. Acesso em: 19 jan. 2026.

BRASIL. MME. Ministério de Minas e Energia. **Portaria nº 79/GM/MME, de 6 de junho de 2024.** Dispõe sobre o aporte de garantia de fiel cumprimento previsto no art. 26, § 1º-L, inciso I, da Lei nº 9.427, de 26 de dezembro de 1996, com redação dada pela Medida Provisória nº 1.212, de 9 de abril de 2024. [Brasília, DF]: MME, 6 jun. 2024a. Disponível em:

<https://www.gov.br/mme/pt-br/aceso-a-informacao/legislacao/portarias/2024/portaria-normativa-n-79-gm-mme-2024.pdf/view>. Acesso em: 19 jan. 2026.

BRASIL. MME. Ministério de Minas e Energia. **Regras privilegiam o uso de fontes de baixa emissão de carbono**, 2024b.

CHIAPPINI, G. Hidrogênio verde, azul, cinza: entenda o que cada cor significa e as perspectivas de desenvolvimento. **Eixos**, 12 out. 2023. Disponível em: <https://eixos.com.br/hidrogenio/hidrogenio-verde-azul-cinza-entenda-o-que-cada-cor-significa-e-as-perspectivas-de-desenvolvimento/>. Acesso em: 19 jan. 2026.

CHIAPPINI, G. Custo do hidrogênio verde precisa cair a US\$ 3/kg para ser competitivo, diz diretor da Prumo. **Eixos**, 15 dez. 2021. Disponível em: <https://eixos.com.br/hidrogenio/custo-do-hidrogenio-verde-precisa-cair-a-us-3-kg-para-ser-competitivo-diz-diretor-da-prumo>. Acesso em: 19 jan. 2026.

EPE. Empresa de Pesquisa Energética. **Balanco Energético Nacional 2024**: ano base 2023. Rio de Janeiro: EPE, 2024. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2024>. Acesso em: out. 2025.

EPE. Empresa de Pesquisa Energética. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2031**. Brasília: Ministério de Minas e Energia, Empresa de Pesquisa Energética, 2022. v.1, p. 336-366, 2022. Disponível em: <https://epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/plano-decenal-de-expansao-de-energia-2031>. Acesso em: out. 2025.

EPE. Empresa de Pesquisa Energética. **Usinas Híbridas no Contexto do Planejamento Energético**: Nota Técnica EPE-DEE-NT-029/2019-r0. Brasília, DF: MME, 2019. Disponível em: [https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-386/EPE\\_DEE\\_NT\\_029\\_2019\\_r0\\_%20Usinas%20híbridas.pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-386/EPE_DEE_NT_029_2019_r0_%20Usinas%20híbridas.pdf). Acesso em: out. 2025.

FERNANDES, G.; AZEVEDO, J.; AYELLO, M.; GONÇALVES, F. Panorama dos desafios do hidrogênio verde no Brasil. **Coluna Opinião**, p. 3-10, jan. 2023. Disponível em: <fgvenergia.fgv.br/opinioes/panorama-dos-desafios-do-hidrogenio-verde-no-brasil>. Acesso em: out. 2025.

GABRIELLI, J. S.; TOKARSKI, A. P. R. Estudos regulatórios para a certificação do hidrogênio verde no Brasil. **Revista Princípios**, v. 43, n. 170, p. 93-114, 2024. DOI: <https://doi.org/10.14295/principios.2675-6609.2024.170.005>. Disponível em: <https://revistaprincipios.emnuvens.com.br/principios/article/view/485>. Acesso em: out. 2025.

LEFOSSE Advogados. **Hidrogênio verde e novas fontes de energia no Brasil**. 2024a. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=NSf1NH8mp7A>. Acesso em: out. 2025.

LEFOSSE Advogados. **Marco Legal do Hidrogênio Verde é aprovado**. 2024b. Disponível em: [lefosse.com](https://lefosse.com). Acesso em: out. 2025.

LIMA, V. O. **Hidrogênio verde como fonte de energia**: visão geral sobre iniciativas regulatórias no Brasil. 2023. 80 f. Trabalho de Conclusão de Curso [Graduação em Engenharia de Energia] – Universidade Federal do Pampa, Campus Bagé, Bagé, 2023. Disponível em: [repositorio.unipampa.edu.br/jspui/handle/riu/9147](https://repositorio.unipampa.edu.br/jspui/handle/riu/9147). Acesso em: 16 jan. 2026.

OLIVEIRA, F. J. A. [org.]. **O planejamento da operação energética no sistema interligado nacional**. São Paulo, SP: Artliber, 2020. Disponível em: <https://www.ons.org.br/Paginas/busca.aspx?k=O+Planejamento+da+operacao+energetica++no+sistema++interligado+nacional>. Acesso em: 16 jan. 2026.

ONS. OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. **Resultados da Operação**, 2020.

PEREIRA, R. M.; BALTAR, M. L. B.; SANTOS, A. S.; ABREU, V. H. S. Desenvolvendo Rotas Sustentáveis: A Contribuição do Hidrogênio em Sistemas de Transporte Inteligentes. //: ANPET CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES, 38., 2024, Florianópolis, SC. **Anais eletrônicos [...]**. [S. l]: Galoá, 2024. Disponível em: <https://proceedings.science/anpet/anpet-2024/trabalhos/desenvolvendo-rotas-sustentaveis-a-contribuicao-do-hidrogenio-em-sistemas-de-tra?lang=pt-br>. Acesso em: 16 jan. 2026.

PEREIRA, R. M.; SANTOS, A. S.; ABREU, V. H. S. Veículos à célula combustível de hidrogênio: um caminho sustentável para a descarbonização do transporte rodoviário. //: CONGRESSO RIO DE TRANSPORTES, 21., 2024, Rio de Janeiro, RJ. **Anais [...]**. Rio de Janeiro: [S. n.], 2024. Disponível em: <https://riodetransportes.org.br/21rdt/trabalhos/trabalhos/140-AC-PT.pdf>. Acesso em: 16 jan. 2026.

PIMENTEL, P. E. O. **Cenários para a transição energética no Brasil 2040**. 2023. 202 f. Tese [Doutorado em Desenvolvimento Sustentável] – Universidade de Brasília, Brasília, 2023. Disponível em: <http://repositorio.unb.br/handle/10482/50109>. Acesso em: out. 2025.

RINGER, N. J. **Desafios do setor de energia eólica no Brasil**: uma abordagem sistêmica. 2014. 153 f. Dissertação [Mestrado em Administração de Organizações] – Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade de Ribeirão Preto, Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto, 2014. DOI: <https://doi.org/10.11606/D.96.2014.tde-18072014-101417>. Disponível em: [teses.usp.br/teses/disponiveis/96/96132/tde-18072014-101417/](https://teses.usp.br/teses/disponiveis/96/96132/tde-18072014-101417/). Acesso em: out. 2025.

SANTOS, A. S.; ABREU, V. H. S. **O Papel do Hidrogênio Verde na Descarbonização dos Sistemas de Energia e Transporte**. 1. ed. Rio de Janeiro: Fundação Coppetec, 2024. 53p. Disponível em: [https://pet.coppe.ufrj.br/images/documentos/Livros/H2VCOPPE-2\\_12-08-20241.pdf](https://pet.coppe.ufrj.br/images/documentos/Livros/H2VCOPPE-2_12-08-20241.pdf). Acesso em: 19 jan. 2026.

SANTOS, J. A. F. A.; LUNA, M. A. R.; CUNHA, F. B. F.; SILVA, M. S.; TORRES, E. A. Geração distribuída no Brasil: análise de sua evolução e aspectos regulatórios. //: CONGRESSO BRASILEIRO DE REGULAÇÃO, 10., 4º EXPO/ABAR, 2017, Florianópolis, SC. **Anais [...]**. Salvador: UFBA, 2017. Disponível em: <https://repositorio.ufba.br/handle/ri/35634>. Acesso em: out. 2025.

SILVA, E. P. C.; FUJIMOTO JÚNIOR, D. Y.; ABREU, V. H. S. Process Safety Aspects in Low Carbon Hydrogen Production via Electrolysis. /n: MUTHU, S. S. [ed.]. **Reduction of Industrial Carbon Footprint**. Cham: Springer Nature Switzerland, 2026. p. 93-116. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-032-10913-2\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-032-10913-2_5). Disponível em: [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-032-10913-2\\_5](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-032-10913-2_5). Acesso em: 19 jan. 2026.

SILVA, J. R. R. **Hidrogênio verde**: proposta de diretrizes para o desenvolvimento do mercado. 2022. 118 f. Dissertação [Mestrado em Engenharia de Produção] – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2022. Disponível em: <repositorio.ufrn.br/handle/123456789/55084>. Acesso em: out. 2025.



**INFORMAÇÕES ADICIONAIS****COMO CITAR ESTE ARTIGO SEGUNDO AS NORMAS DA REVISTA**

**ABNT:** SILVA, P. H. R.; ABREU, V. H. S. Hidrogênio verde como vetor da descarbonização energética no Brasil. *Vértices [Campos dos Goytacazes]*, v. 27, n. 3, e27323545, 2025. DOI: <https://doi.org/10.19180/1809-2667.v27n32025.23545>. Disponível em: <https://editoraessentia.iff.edu.br/index.php/vertices/article/view/23545>.

**APA:** Silva, P. H. R., & Abreu, V. H. S. [2025]. **Hidrogênio verde como vetor da descarbonização energética no Brasil.** *Vértices [Campos dos Goytacazes]*, 27(3), e27323545. <https://doi.org/10.19180/1809-2667.v27n32025.23545>

**DADOS DO AUTOR E AFILIAÇÃO INSTITUCIONAL**

**Pedro Henrique Rosan Silva** - MBA em Energias pelo Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro [UFRJ]. Engenheiro de Projetos na Cobra Brasil - Rio de Janeiro, RJ - Brasil. E-mail: [pedrorosan@gmail.com](mailto:pedrorosan@gmail.com).

**Victor Hugo Souza de Abreu** - Doutor pela Universidade Federal do Rio de Janeiro [PET/COPPE/UFRJ]. Professor Adjunto de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio de Janeiro [DET/POLI/UFRJ] - Rio de Janeiro, RJ - Brasil. E-mail: [vhsa@poli.ufrj.br](mailto:vhsa@poli.ufrj.br).

**FINANCIAMENTO**

Os autores declararam não haver tido financiamento externo para a pesquisa.

**APROVAÇÃO DO COMITÊ DE ÉTICA NA PESQUISA**

Não se aplica.

**CONFLITO DE INTERESSES**

Os autores declararam não haver conflito de interesses.

**DISPONIBILIDADE DOS DADOS**

Não se aplica.

**DECLARAÇÃO DE USO DE IA**

Os autores declararam não haver usado ferramentas de inteligência artificial generativa na pesquisa e na escrita do artigo.

**DECLARAÇÃO DE DIREITO AUTURAL**

Este documento é protegido por Copyright © 2025 pelos Autores

**LICENÇA DE USO**

Esta obra está licenciada sob uma [Licença Creative Commons](#). Os usuários têm permissão para copiar e redistribuir os trabalhos por qualquer meio ou formato, e também para, tendo como base o seu conteúdo, reutilizar, transformar ou criar, com propósitos legais, até comerciais, desde que citada a fonte.

**RESPONSABILIDADE PELA PUBLICAÇÃO**

Essentia Editora, coordenação subordinada à PROPPIE do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense. As ideias expressadas neste artigo são de responsabilidade de seus autores, não representando, necessariamente, a opinião dos editores ou da Essentia Editora.

**NOTA**

Este texto é fruto de um trabalho de pesquisa originalmente apresentado pelos autores no ENSUS 2025 - XIII Encontro de Sustentabilidade em Projeto - UFSC - Florianópolis - 30 de julho a 1 de agosto de 2025. O artigo foi selecionado pela Comissão Científica do Evento para compor edições especiais de periódicos científicos e foi aprovado para compor um Dossiê Temático da Revista Vértices.