

ANÁLISE DE VIABILIDADE FINANCEIRA DA PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO VERDE E DE SUAS APLICAÇÕES: GEORREFERENCIAMENTO DA VIABILIDADE FINANCEIRA DA PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO VERDE NO BRASIL

João Vitor Gonçalves Gomes – d2022003684@unifei.edu.br

Matheus Júnior Martins da Silva – matheus.jm.silva2409@gmail.com

Victor Eduardo de Mello Valerio – victor.dmv@unifei.edu.br

Sandra Miranda Neves – sandraneves@unifei.edu.br

Palavras-chave: Hidrogênio verde, Viabilidade financeira, Energia renovável, Eletrolise PEM, Sustentabilidade.

1. INTRODUÇÃO

O aumento contínuo da demanda energética mundial está diretamente relacionado ao avanço industrial e ao crescimento populacional, o que impõe a necessidade de soluções sustentáveis para garantir a segurança energética global (BERRADA, 2021). A expectativa é que essa demanda cresça 1,3% ao ano até 2040, exigindo uma profunda transformação nas matrizes energéticas existentes (BHANDARI, 2021).

As mudanças climáticas e os impactos ambientais provenientes da queima de combustíveis fósseis têm impulsionado a busca por alternativas energéticas limpas e renováveis. Nesse contexto, a descarbonização surge como estratégia essencial para limitar o aquecimento global abaixo de 2 °C, ou idealmente 1,5 °C, conforme metas internacionais (BERRADA, 2021).

Entre as opções emergentes, o hidrogênio verde se destaca como vetor energético promissor por ser obtido a partir de fontes renováveis, como energia solar ou eólica (SUPERCHI, 2023). Esse vetor apresenta ampla aplicabilidade, abrangendo os setores de transporte, geração elétrica e processos industriais, contribuindo para a redução de emissões de gases de efeito estufa (NASSER, 2022). De acordo com a Agência Internacional de Energia (AIE, 2019) e a Agência Internacional de Energia Renovável (IRENA, 2019), o hidrogênio verde é estratégico para a descarbonização de setores intensivos em carbono, como a indústria pesada e o transporte de longa distância.

Contudo, atualmente, cerca de 97% do hidrogênio produzido globalmente ainda depende de rotas baseadas em combustíveis fósseis, resultando em elevadas emissões de carbono (BENALCAZAR, 2022). Apesar de sua viabilidade ambiental, os altos custos de eletricidade e investimento, OPEX e CAPEX, respectivamente, ainda limitam sua competitividade. Assim, a análise da viabilidade econômica, considerando o custo nivelado de produção (LCOH) torna-se essencial.

Com base no exposto, este estudo tem por objetivo geral avaliar a viabilidade da produção descentralizada de hidrogênio verde no Brasil combinada com a instalação de sistemas solares fotovoltaicos, considerando aspectos tecnológicos, econômicos e regulatórios, a fim de contribuir para a transição energética e a consolidação de uma matriz de baixo carbono.

2. DESENVOLVIMENTO

2.1 Referencial teórico

A viabilidade econômica da produção de hidrogênio verde depende de diversos fatores técnicos, financeiros e regulatórios que influenciam sua competitividade em relação às tecnologias baseadas em combustíveis fósseis. Entre esses fatores, destacam-se os custos de investimento inicial, os gastos operacionais, os incentivos financeiros disponíveis, a carga tributária e o custo final de produção do hidrogênio (BENALCAZAR, 2022).

Para avaliar de forma abrangente o desempenho econômico de projetos de hidrogênio verde, utiliza-se o Custo Nivelado de Hidrogênio (Levelized Cost of Hydrogen – LCOH), que expressa o custo por unidade de hidrogênio produzida ao longo da vida útil do projeto, considerando todos os fluxos de gastos. O LCOH integra investimentos iniciais (CAPEX), custos operacionais e de manutenção (OPEX), despesas administrativas, financeiras e tributárias e o volume total de hidrogênio produzido, permitindo comparações consistentes entre diferentes tecnologias, rotas de produção e escalas de implementação.

Matematicamente, o LCOH é definido pela seguinte equação:

$$LCOH = \frac{\frac{(CAPEX_t + OPEX_t + Despesas_t)}{(1 + WACC)^t}}{\frac{H_t}{(1 + WACC)^t}} \quad (1)$$

Em que:

- $CAPEX_t$ – Investimento em Capital Fixo no ano t , $t = 0, 1, 2, \dots, n$
- $OPEX_t$ – Custos de Operação e Manutenção no ano t , $t = 0, 1, 2, \dots, n$
- $Despesas_t$ – Despesas no ano no ano t , $t = 0, 1, 2, \dots, n$
- $WACC$ – Custo de Capital do Projeto
- H_t – Produção de Hidrogênio Verde no ano t , $t = 0, 1, 2, \dots, n$

2.2 Método de Pesquisa

A pesquisa classifica-se como quantitativa, por se basear em dados numéricos e análises financeiras para avaliar a viabilidade econômica da produção de hidrogênio

verde. Quanto à sua natureza, é uma pesquisa aplicada, voltada à solução de um problema prático no contexto da transição energética brasileira. Os objetivos apresentam caráter descritivo, ao investigar aspectos técnicos e econômicos do tema. O método adotado é de modelagem (ANDRADE et al., 2024).

Para se realizar uma análise de viabilidade de produção de hidrogênio estruturou-se um projeto piloto dimensionado em Itajubá-MG, operando durante 251 dias por ano, em um turno (8h), resultando em produção anual de 40.160 kg de H₂. A escolha da tecnologia de produção eletrólise PEM se fundamenta em sua elevada eficiência, capacidade de operar em alta densidade de corrente, resposta dinâmica rápida a fontes renováveis intermitentes e produção de hidrogênio de alta pureza. O sistema funciona em modo on-grid, utilizando energia fotovoltaica como fonte, com potência instalada de 2.483 kWp, calculada a partir da irradiação média da cidade de Itajubá (4,03 kWh/kWp/dia).

O dimensionamento do sistema considera três subsistemas principais: eletrolisador PEM, sistema fotovoltaico e compressão para armazenamento do hidrogênio verde produzido. A potência do eletrolisador foi de 1.250 kW, enquanto os quatro compressores têm consumo total de 0,5 kW/h cada. O CAPEX total do projeto piloto situa-se entre R\$14,8 milhões e R\$16,5 milhões, enquanto o OPEX anual varia de R\$262.912,71 a R\$777.810,22, representando aproximadamente 8% a 9% do investimento total. Destaca-se que foi considerado os limites superiores e inferiores de CAPEX e OPEX encontrados na literatura para se definir os intervalos dos cenários otimista e pessimista.

Com base nesses dados, foi elaborado o fluxo de caixa do projeto, permitindo a avaliação da viabilidade econômica e o cálculo do Custo Nivelado de Hidrogênio (LCOH) para uma vida útil de 25 anos. O modelo considera efeitos do regime tributário brasileiro, incluindo PIS, COFINS, ICMS, IRPJ e CSLL, além da depreciação contábil e despesas operacionais, considerando um WACC de 10% ao ano.

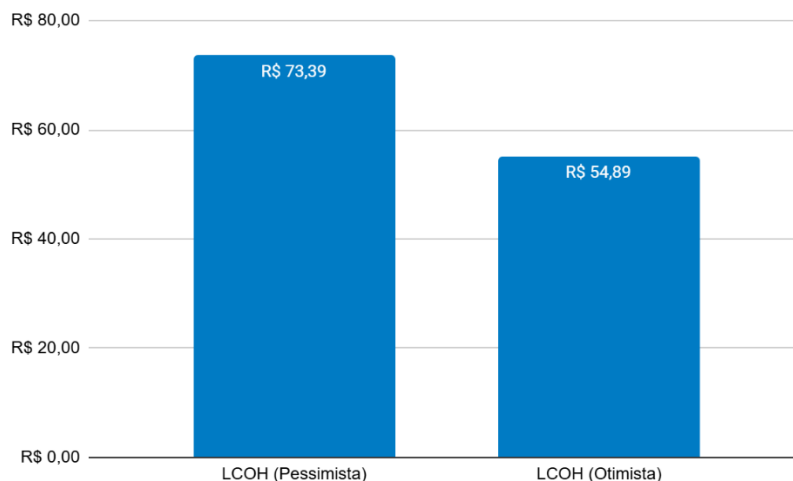
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com base no fluxo de caixa organizado a partir dos parâmetros considerados para o cenário pessimista e otimista de CAPEX e OPEX e despesas administrativas e tributárias obteve-se os seguintes resultados de preço mínimo de hidrogênio para viabilidade do projeto no município de Itajubá-MG.



IEPG SUMMIT'25

Pensando o futuro com *inteligência*
artificial e *consciência social*



Os resultados parciais mostram coerência com valores reportados na literatura, que situam o LCOH entre 3 e 15 US\$/kg H₂, a depender das condições regionais e da escala produtiva. Assim, o projeto confirma a viabilidade técnica da integração entre energia fotovoltaica e eletrólise PEM no Brasil, ainda que a viabilidade financeira dependa fortemente de fatores geográficos, econômicos e de políticas de incentivo voltadas à transição energética.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos até o momento indicam a viabilidade técnica da produção de hidrogênio verde por meio da integração entre energia fotovoltaica e eletrólise do tipo PEM, destacando o potencial do Brasil nesse cenário. A pesquisa demonstra coerência com valores reportados na literatura e encontra-se em expansão para todos os municípios brasileiros, etapa que possibilitará a elaboração de mapas georreferenciados de viabilidade técnica e econômica.

Verifica-se que a competitividade do hidrogênio verde depende de fatores como custo de capital, incentivos fiscais, disponibilidade de financiamento e estabilidade regulatória. Assim, políticas públicas voltadas à redução do CAPEX e estímulo à inovação são essenciais para consolidar essa rota produtiva.

O estudo contribui ao propor uma abordagem georreferenciada inédita, reforçando a relevância do hidrogênio verde como vetor estratégico para a transição energética e para a construção de uma economia nacional de baixo carbono.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Programa de Educação Tutorial (PET) Engenharia de Produção da Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI.

REFERÊNCIAS

ANDRADE, Jorge Vleberton Bessa de et al. Perspective under uncertainty and risk in green hydrogen investments: a stochastic approach using Monte Carlo simulation. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 49, p. 385–404, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.08.253>.

BENALCAZAR, Pablo; KOMOROWSKA, Aleksandra. Prospects of green hydrogen in Poland: A techno-economic analysis using a Monte Carlo approach. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 47, n. 9, p. 5779-5796, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.12.001>.

BERRADA, Asmae; LAASMI, Mohammad Aymane. Technical-economic and socio-political assessment of hydrogen production from solar energy. **Journal of Energy Storage**, v. 44, p. 103448, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103448>.

BHANDARI, Ramchandra; SHAH, Ronak Rakesh. Hydrogen as energy carrier: Techno-economic assessment of decentralized hydrogen production in Germany. **Renewable Energy**, [S. l.], v. 177, p. 915-931, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.05.149>.

NASSER, Mohamed et al. Performance evaluation of PV panels/wind turbines hybrid system for green hydrogen generation and storage: Energy, exergy, economic, and enviroeconomic. **Energy Conversion and Management**, v. 267, 115870, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115870>.

SUPERCHI, Francesco et al. Development of a reliable simulation framework for techno-economic analyses on green hydrogen production from wind farms using alkaline electrolyzers. **Renewable Energy**, v. 207, p. 731–742, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.03.077>.