

“Do conhecimento acadêmico à transformação sustentável: inovação com validação científica”**GERAÇÃO HÍBRIDA HIDRÁULICA-FOTOVOLTAICA NO BRASIL: UM ESTUDO ENERGÉTICO, ECONÔMICO E DE SEU POTENCIAL NA PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO**Luiza Helena R. Barbosa¹ (IC), Ivan F. S. Santos (PQ)¹¹Universidade Federal de Itajubá**Palavras-chave:** Complementariedade. Hidrogênio verde. Painéis fotovoltaicos flutuantes. Usina híbrida.**Introdução**

A matriz elétrica brasileira é uma das mais renováveis do mundo, alcançando 91,2% de renovabilidade (BEN, 2025). Na 26ª Conferência das Nações Unidas sobre Mudanças do Clima de 2021 (COP 26), a Agência Internacional de Energia (IEA) e a Agência Internacional de Energias Renováveis (IRENA) divulgaram que as hidrelétricas são uma alternativa estratégica para o cumprimento das metas climáticas estabelecidas no Acordo de Paris (Soares et al., 2022). Segundo o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) para o ano de 2025, a potência instalada do país alcança o incrível valor de 241.502 MW.

Atualmente, a energia solar representa 9,3% da matriz elétrica brasileira (BEN 2025). Esse percentual tem grande potencial para crescer. Contudo, uma dificuldade encontrada na instalação dos sistemas fotovoltaicos convencionais é a questão do seu espaço ocupado, sendo muitas vezes necessário o desmatamento ou modificação da paisagem de uma região para a implementação do projeto. Por isso, a concepção de painéis fotovoltaicos flutuantes (FVF) vem sendo fortemente explorada e analisada (Silva; Souza, 2017).

Um conceito inovador no ramo das energias renováveis é a produção de hidrogênio. O hidrogênio é um vetor de energia raramente encontrado na natureza de forma livre, geralmente associado a outro elemento ou compostos químicos em forma gasosa. É o combustível com maior quantidade de energia por unidade de massa, com um poder calorífico superior de 3,54 kWh/Nm³ (39,42 kWh/kg), sendo 2 a 3 vezes maior do que outros combustíveis (Palhares, 2016).

Devido a sua versatilidade de armazenamento, incluindo em baterias, ar comprimido e rodas cinéticas, o Hidrogênio pode ser utilizado como combustível em veículos e geradores. Ele também pode operar em setores como o de aquecimento, indústrias e eletricidade, os quais juntos, são uma parcela

considerável das emissões globais de CO₂ (Barroso et al., 2023).

O Hidrogênio só é considerado Verde se advir de uma fonte primária renovável que forneça energia ao processo e for um subproduto da eletrólise da água (Projeto H2Brasil, 2023).

Uma solução engenhosa na produção e armazenamento de Hidrogênio Verde é utilizar sistemas híbridos hídrico-solar com painéis fotovoltaicos flutuantes em usinas hidrelétricas. Essa integração potencializa a resiliência do sistema energético, diversificando a matriz energética e ajudando na redução das emissões de carbono (Botelhos; Moraes; Oliveira, 2024).

Em um sistema híbrido, a energia excessiva gerada pelos painéis solares pode ser utilizada para operar eletrolisadores, aproveitando assim a energia renovável e reduzindo a dependência de fontes de energia convencionais (Botelho; Moraes; Oliveira, 2024).

Essa pesquisa tem como objetivo avaliar a capacidade de geração de energia elétrica por meio de painéis fotovoltaicos flutuantes (FVF) instalados em uma fração da área de um reservatório, destinando parte dessa energia à produção de Hidrogênio Verde, analisando os potenciais de produção e os custos associados a esses processos. As usinas utilizadas para esse estudo estão descritas na Tabela 1.

Tabela 1 – Usinas selecionadas

UHE	Capacidade Instalada	Área alagada
Estreito - MA	1.087 MW	555 km ²
Foz do Chapecó - RS	346 MW	79,2 km ²
Furnas - MG	1.216 MW	1.440 km ²
Luiz Gonzaga - PE	1.479 MW	834 km ²

“Do conhecimento acadêmico à transformação sustentável: inovação com validação científica”

Metodologia

A curva de permanência indica a frequência com que um determinado parâmetro é observado ao longo de um período de análise. Neste trabalho, ela será usada para representar a frequência da geração de energia em um sistema. A faixa das abscissas exibe a frequência em porcentagem (%) da geração de energia em megawatts (MW) de uma usina.

Os dados usados na elaboração das curvas nas hidrelétricas foram retirados da ONS (Operador Nacional do Sistema Elétrico), considerando os valores médios diários entre 01/01/2015 até 31/12/2024, totalizando 3621 dados por usina.

O percentual do reservatório destinado aos painéis flutuantes foi estabelecido com o objetivo de determinar o valor mínimo necessário para que a capacidade híbrida (solar e hídrica) assegurasse a produção de energia da hidrelétrica atingisse, pelo menos, 75% do tempo em sua capacidade máxima original, compensando os períodos de baixa geração e aprimorando seu desempenho geral.

Determinou-se a produção de energia solar diária aplicado na hidrelétrica através da equação 1, utilizando os dados disponíveis na CRESEB (2025). Dessa maneira, o potencial de geração de energia total da usina híbrida se dá pela equação 2. A razão de desempenho e a eficiência dos painéis foram definidas de acordo com os estudos de Dalcin (2021).

$$\text{Geração solar diária [MWh/dia]} = (\text{Is.m} * \text{Rp} * \eta_p * \text{Ar} * 10^6 * \text{Pr}) / 1000 \quad (1)$$

$$\text{Geração Híbrida [MW]} = \text{Geração hídrica diária} + \text{Geração solar diária} \quad (2)$$

Onde:

Is.m [KWh/dia.m²]: Irradiação solar mensal média

- Valor adotado: Referente ao mês em análise

Rp: Razão de Performance dos painéis

- Valor adotado: 0,75

η_p : Eficiência dos painéis - Valor adotado: 0,20

Ar [km²]: Área total do reservatório

Pr [%]: Percentual da área do reservatório destinada aos painéis fotovoltaicos flutuantes

A energia solar produzida anualmente pelos painéis flutuantes depende da energia gerada por cada painel e do número total de painéis instalados. A energia por painel é calculada pela equação 3, enquanto o número de painéis é determinado pela equação 4. Com esses valores definidos, a energia solar anual pode ser obtida por meio da equação 5.

$$\text{Energia por painel [kWh/dia]} = \text{Is.a} * \text{Rp} * \eta_p * \text{Ap} \quad (3)$$

$$\text{Número de painéis} = \frac{\text{Área selecionada aos painéis}}{\text{Área do painel}} \quad (4)$$

$$\text{Energia solar produzida [kWh/ano]} = \text{Ep} * \text{Np} * 365 \quad (5)$$

Onde:

Is.a [KWh/dia.m²]: Irradiação solar anual média

Ap [m²]: Área do painel → Valor adotado: 1,95

A energia total gerada pelo hidrogênio é calculada pela equação 6, que leva em conta uma eficiência do eletrolisador de 90% ao longo do tempo, valor definido pelos autores considerando períodos destinados à manutenção. Com base em Azevedo et al. (2025), a quantidade de hidrogênio produzida, expressa em toneladas, é determinada pela equação 7.

$$\text{Energia H2 [MW/ano]} = \text{Ph} * 24 * 365 * 0,9 \quad (6)$$

$$\text{H2 produzido [t/ano]} = \text{Energia} / 50 \quad (7)$$

O Custo Nivelado de Hidrogênio (LCOH) foi determinado pela equação 8, enquanto o investimento total pode ser calculado pela equação 9 e, seu custo de operação e manutenção é estimado pela equação 10.

$$\text{LCOH} = \frac{\text{Investimento}_{\text{Total}} + \sum_{j=1}^n \frac{\text{Custo de OP\&M}}{(1+i)^j}}{\sum_{j=1}^n \frac{\text{massa H2}}{(1+i)^j}} \quad (8)$$

$$\text{Investimento total} = \left(\text{CAPEX}_{\text{solar}} * \text{Potencial}_{\text{solar}} \right) + \left(\text{CAPEX}_{\text{H2}} * \text{Potencial}_{\text{H2}} \right) \quad (9)$$

$$\text{Custo de OP\&M} = \left(\left(\text{OPEX}_{\text{solar}} + \text{ENCARGOS}_{\text{solar}} \right) * \text{Potencial}_{\text{solar}} \right) + \left(\left(\text{OPEX}_{\text{H2}} + \text{ENCARGOS}_{\text{H2}} \right) * \text{Potencial}_{\text{H2}} \right) \quad (10)$$

“Do conhecimento acadêmico à transformação sustentável: inovação com validação científica”

Segundo Martins (2025) e consultando o Ministério de Minas e Energia (2024), os valores adotados para atender os cálculos se encontram na Tabela 2.

Tabela 2 – Valores adotados

$i = 8\%$	$n = 20$ anos
CAPEX solar = R\$5.000,00	CAPEX H2 = R\$5.065,70
OPEX solar = R\$65,00	OPEX H2 = R\$16.519.247,31
ENCARGOS solar = R\$150,00	ENCARGOS H2 = R\$0,00

O percentual da energia híbrida gerada destinado à produção de hidrogênio foi definido considerando o menor valor necessário que não comprometesse o desempenho idealizado de 75% para a hidrelétrica acoplada aos painéis.

Com os dados tratados e organizados, foi possível estabelecer novas curvas de permanência, que indicam a frequência, expressa em porcentagem (%), com que determinados valores de geração combinada (hídrica e solar), em megawatts (MW), ocorrem na usina híbrida.

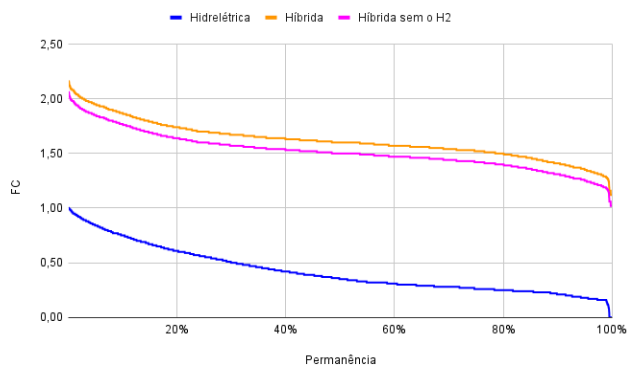
Resultados e discussão

Com os cálculos realizados e os gráficos elaborados, é possível analisar os resultados com base na Tabela 1 e nas Figuras 1, 2, 3, 4 e 5.

Tabela 1 – Informações adicionais

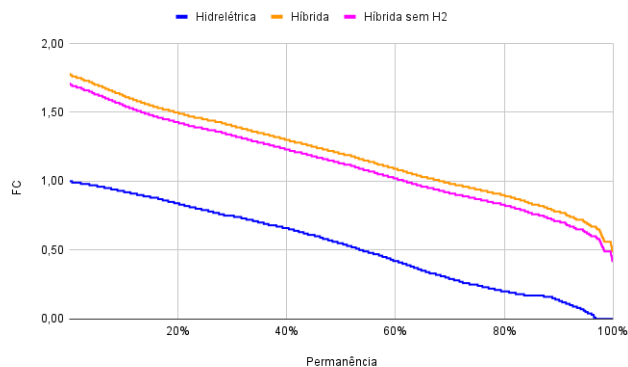
UHE	% do reservatório destinada FVF	% da energia destinada ao H2
Estreito	0,3%	10%
Foz do Chapecó	1%	7%
Furnas	0,1%	6%
Luiz Gonzaga	5%	12%

Figura 1 – Curva de permanência UHE Estreito



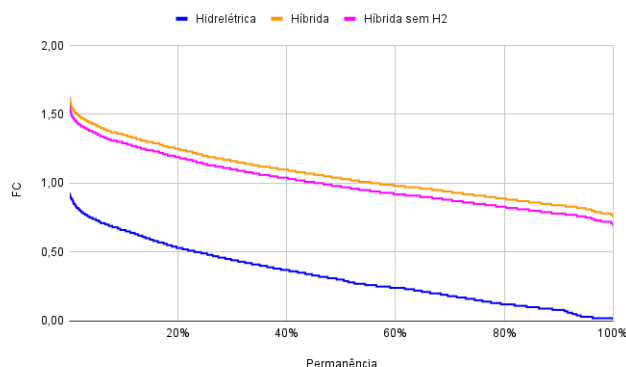
Fonte: Autores, 2025

Figura 2 – Curva de permanência UHE Foz do Chapecó



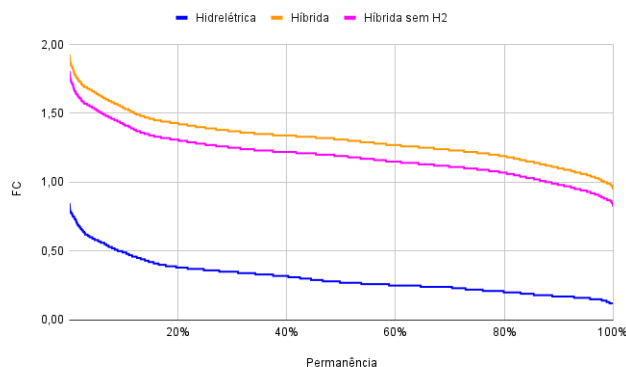
Fonte: Autores, 2025

Figura 3 – Curva de permanência UHE Furnas



Fonte: Autores, 2025

Figura 4 – Curva de permanência UHE Luiz Gonzaga



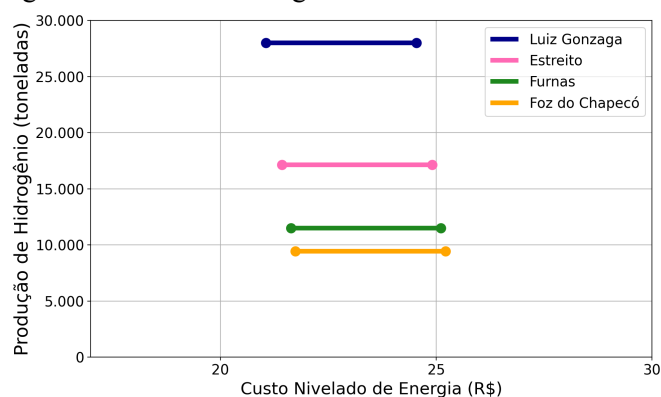
Fonte: Autores, 2025

Como não é possível identificar a origem específica para a produção do hidrogênio (se é proveniente da energia hídrica ou solar), seu custo em reais por kg produzido

“Do conhecimento acadêmico à transformação sustentável: inovação com validação científica”

pode variar dependendo dos valores econômicos associados a cada fonte de energia. Dessa forma, na Figura 5, os valores de H₂ são representados por uma linha dispersa, que abrange o intervalo de custos possíveis.

Figura 5- Potencial Energético e Viabilidade Econômica



Fonte: Autores, 2025

Conclusões

Através de estudos detalhados, revisões de dados e aplicação da metodologia proposta, concluímos que a integração de painéis fotovoltaicos em hidrelétricas para a geração de energia híbrida representa uma abordagem inovadora para a renovabilidade da matriz energética brasileira. Essa solução destaca-se pela complementariedade entre os sistemas hídrico e solar, contribuindo para a construção de um futuro mais sustentável.

Nosso estudo indicou que a alocação de pequenas áreas dos reservatórios, variando de 0,1% a 5% da superfície alagada total, foi suficiente para assegurar o funcionamento das usinas em 100% de sua capacidade máxima original por 75% do tempo. Além disso, a partir de uma fração reduzida da energia gerada — entre 6% e 12% no pior e no melhor cenário —, estima-se a produção de aproximadamente 10.000 toneladas de hidrogênio (H₂), onde o custo por kg ficou entre R\$20,00 até R\$30,00, demonstrando o potencial dessa tecnologia.

Assim, este trabalho reforça que as usinas híbridas hídrico-fotovoltaicas constituem uma alternativa viável, com significativo potencial de geração de energia e viabilidade econômica, além de abrir perspectivas para a produção de hidrogênio. Contudo, ainda são necessárias pesquisas adicionais para refinar as ideias, otimizar os

cálculos e avaliar suas implicações, visando atingir um futuro mais resiliente e sustentável para todos.

Agradecimentos

Agradeço à CNPq pelo financiamento e oportunidade de realizar esta pesquisa, à UNIFEI pelo incentivo à ambiente acadêmico e desenvolvimento intelectual e, ao Dr. Ivan Felipe, por sua orientação e apoio durante todo o processo.

Referências

- AZEVEDO, J. H. P.; PRADELLÉ, F.; BOTELHO, V.; SERRA, E. T.; PRADELLÉ, R. N. C.; BRAGA, S. L. An integrated geospatial model for evaluating offshore wind-to-hydrogen technical and economic production potential in Brazil. *International Journal of Hydrogen Energy*, [s.l.], v. 100, 27 jan. 2025, p. 800-815
- BARROSO, A. M. R.; et al. Obtenção do hidrogênio verde a partir de energias renováveis. Teresina: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Piauí, 2017. 13 p.
- BOTELHO, D. F.; MORAES, C. A.; OLIVEIRA, L. W. Green hydrogen production from hydro spilled energy in Brazilian hydropower plants. *International Journal of Hydrogen Energy*, Rio de Janeiro, v. 68, p. 575-585, abr. 2024.
- DALCIN, L. Sistema fotovoltaico flutuante integrado ao manejo de macrofitas aquáticas para produção de biogás em reservatórios de usinas hidrelétricas. Trabalho de Pós-Graduação - Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2021.
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Balanço Energético Nacional 2025: relatório síntese: ano base 2024. Rio de Janeiro: EPE, 2025. 74 p.
- MARTINS, K. D. S. Avaliação econômica da produção de hidrogênio usando fontes renováveis no Nordeste do Brasil. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Instituto de Recursos Naturais, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2025.
- MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Parâmetros de Custos: Geração e Transmissão. Estudos do Plano Decenal de Expansão de Energia 2034. Brasília, DF: Empresa de Pesquisa Energética, ago. 2024.
- PALHARES, D. D. F. Produção de hidrogênio por eletrólise alcalina da água e energia solar. 2016. 121 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2016.
- SCHNEIDER, P. S.; et al. Energias renováveis e sua integração no H₂ Verde. Brasília: Projeto H₂Brasil, 2023. 121 p. (Coleção 1: Conceitos do H₂ Power-to-X, v. 3).
- SILVA, G. D. P.; SOUZA, M. J. R. Estimativa de geração de energia através de um sistema fotovoltaico: implicações para um sistema flutuante no Lago Bolonha, Belém-Pará. *Revista Brasileira de Energias Renováveis*, Rio de Janeiro, v. 6, n. 4, p. 176-190, 2017.
- SOARES, K. J.; et al. Marcos históricos do setor hidrelétrico brasileiro. *Research, Society and Development*, v. 11, n. 7, p. e9211729680, 2022.