

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

ANÁLISE BIBLIOGRÁFICA DO EFEITO DAS PLATAFORMAS FOTOVOLTAICAS FLUTUANTES NA TAXA DE EVAPORAÇÃO EM RESERVATÓRIOS ARTIFICIAIS

Nágila Veiga Adrião Monteiro¹; Paola Andrea Rico Belalcazar²; Julio Gomes³; Marcelo Rizzo Errera⁴; Marcell Mariano Corrêa Maceno⁵; Tobias Bleninger⁶

Abstract: The growing demand for water management and renewable energy is driving the search for innovative solutions. Brazil, with its high hydroelectric capacity, presents a promising scenario for the installation of Floating Photovoltaic Plants (FPVs) on artificial reservoirs. In addition to generating clean energy, FPVs can mitigate evaporation, a significant factor in the loss of water in water bodies. The aim of this study was to synthesize and analyze studies investigating the influence of PVs on the rate of water evaporation, contributing to the assessment of the sustainability and multifunctional benefits of this technology. The literature review, carried out in databases such as Scielo, Google Scholar, Web of Science and Science Direct, covered research from 2019 onwards and showed a growing interest in the topic, especially since 2022. Despite the dual strategic benefits of FPVs - energy generation and water conservation - the literature review identified that evaporation is often neglected in FPV use calculations, even though it interferes with the thermal balance and surface insulation overlooked in water. There is a lack of data, models, designs, long-term monitoring and climate change studies, as well as the need for contextualized analyses of feasibility and socio-regulatory aspects. These gaps limit the optimization and expansion of this technology, particularly in Brazil.

Resumo: A crescente demanda por gestão hídrica e energias renováveis impulsiona a busca por soluções inovadoras. O Brasil, com sua alta capacidade hidrelétrica, apresenta um cenário promissor para a instalação de Usinas Fotovoltaicas Flutuantes (FPVs) em reservatórios artificiais. Além de gerar energia limpa, as FPVs podem mitigar a evaporação, um fator significativo na perda de água em corpos hídricos. Este trabalho teve como objetivo sintetizar e analisar estudos que investigam a influência das FPVs na taxa de evaporação da água, contribuindo para a avaliação da sustentabilidade e dos benefícios multifuncionais dessa tecnologia. A revisão bibliográfica, realizada em bases de dados como Scielo, Google Scholar, Web of Science e Science Direct, abrangeu pesquisas a partir de 2019 e apresentou um interesse crescente no tema, especialmente desde 2022. Apesar dos duplos benefícios estratégicos das FPVs – geração de energia e conservação hídrica –, a análise da literatura

¹) Estudante de doutorado, Universidade Federal do Paraná, e-mail: nagila.monteiro@ufpr.br

²) Estudante de doutorado, Universidade Federal do Paraná, e-mail: paola.belalcazar@ufpr.br

³) Professor, Departamento de Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Paraná, Brasil, e-mail: jgomes.dhs@ufpr.br

⁴) Professor, Departamento de Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Paraná, Brasil, e-mail: Errera@ufpr.br

⁵) Professor, Departamento de Engenharia de Produção, Universidade Federal do Paraná, Brasil, e-mail: marcell.maceno@ufpr.br

⁶) Professor, Departamento de Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Paraná, Brasil, e-mail: bleninger@ufpr.br

identificou que a evaporação é frequentemente negligenciada nos cálculos de uso das FPVs, embora interfira no balanço térmico e insolação em superfície desprezada na água. Há uma carência de dados, modelos, designs, acompanhamento a longo prazo e estudos sobre alterações climáticas, bem como a necessidade de análises contextualizadas de viabilidade e aspectos sócio regulatórios. Essas lacunas limitam a otimização e a ampliação dessa tecnologia, particularmente no Brasil.

Palavras-Chave – Evaporação, Escassez hídrica, Impactos Ambientais, Usinas Flutuantes Fotovoltaicas, Energias Renováveis, Reservatórios Hídricos.

INTRODUÇÃO

As políticas públicas desempenham um papel estruturante na transição energética ao definirem marcos legais e instrumentos regulatórios para o fomento de fontes renováveis. A efetividade dessas políticas depende de fatores como vontade política, coordenação institucional e participação social. Diversos países têm implementado mecanismos para reestruturar seus sistemas energéticos e ampliar a integração de energias renováveis, como forma de aumentar a resiliência frente aos efeitos das mudanças climáticas e à ocorrência de eventos hidrometeorológicos extremos (Werner e Lazaro, 2023; Rosa-Clot, 2020).

No caso brasileiro, o contexto é marcado por uma matriz eletrica predominantemente renovável, com forte dependência da geração hidrelétrica. Segundo Silva et al. (2023), o país possui o segundo maior potencial hidrelétrico instalado do mundo, representando 56,8% da matriz elétrica. Em 2024, a geração por hidrelétricas responde por aproximadamente 48,7% da capacidade instalada, com projeções de redução para 42,7% até 2028, devido ao crescimento das fontes eólica e solar (ONS, 2024). Dada a extensão territorial e a disponibilidade de reservatórios artificiais, estima-se que a ocupação de apenas 1% da superfície desses corpos hídricos com usinas fotovoltaicas flutuantes (FPVs) poderia gerar até 57.384 GWh por ano, representando até cinco vezes a capacidade atual de geração solar instalada.

No entanto, a localização de grandes usinas hidrelétricas em regiões de alta biodiversidade, a incerteza quanto à disponibilidade hídrica futura e os impactos das mudanças climáticas sobre os recursos hídricos impõem desafios relevantes ao planejamento energético. Essas limitações evidenciam a importância de incorporar a perspectiva territorial e o conexão entre água, energia e clima nas políticas setoriais (Daszkiewicz, 2020). Segundo o IPCC (2024), a mitigação das emissões de gases de efeito estufa requer, até 2030, uma redução mínima de 55%, o que reforça a necessidade de tecnologias complementares à geração hídrica tradicional.

Dentre as estratégias de adaptação e mitigação, destaca-se a necessidade de aprimorar o manejo e o armazenamento da água, particularmente em regiões áridas e semiáridas. Reservatórios desempenham funções críticas no fornecimento hídrico, na geração energética e no controle de cheias. No entanto, perdem volumes significativos por evaporação superficial. Essa perda, apesar de relevante, tem sido pouco quantificada e modelada de forma inconsistente em avaliações hidrológicas de infraestrutura, necessitando de aprimoramento (Friedrich et al., 2018).

Nesse cenário, os sistemas fotovoltaicos flutuantes (FPVs, do inglês, floating photovoltaic systems) apresentam-se como uma tecnologia promissora com benefícios potenciais múltiplos, incluindo a geração de energia elétrica e a mitigação da evaporação sendo os mais citados entre outros. Estudos indicam que a cobertura parcial da lâmina d'água pode reduzir a absorção da radiação solar em até 50%, o que interfere diretamente no balanço energético que regula a evaporação (Rosa-Clot, 2020; Lopes et al., 2022; Silva et al., 2023). No entanto, a complexidade do fenômeno envolve variáveis como a velocidade do vento, a umidade relativa do ar, temperatura do ar, temperatura da

água e o microclima gerado pela própria instalação dos painéis, demandando modelagens e medições empíricas.

O levantamento bibliográfico foi conduzido considerando os trabalhos encontrados a partir de 2019 (Sampaio e Mancini, 2007), nas bases das plataformas *Scielo*, *Google Scholar*, *Web of Science* e *Science Direct* etc. Analisando o impacto da instalação de FPVs na taxa de evaporação de corpos hídricos. O Brasil tem a oportunidade de se estabelecer como pioneiro no setor de FPVs, contribuindo para seu futuro energético sustentável e para a transição global para fontes renováveis. O efeito das FPVs na evaporação, tanto para a conservação de recursos hídricos quanto para a avaliação da sustentabilidade e dos benefícios multifuncionais dessa tecnologia, sendo uma revisão potencial para estudos futuros.

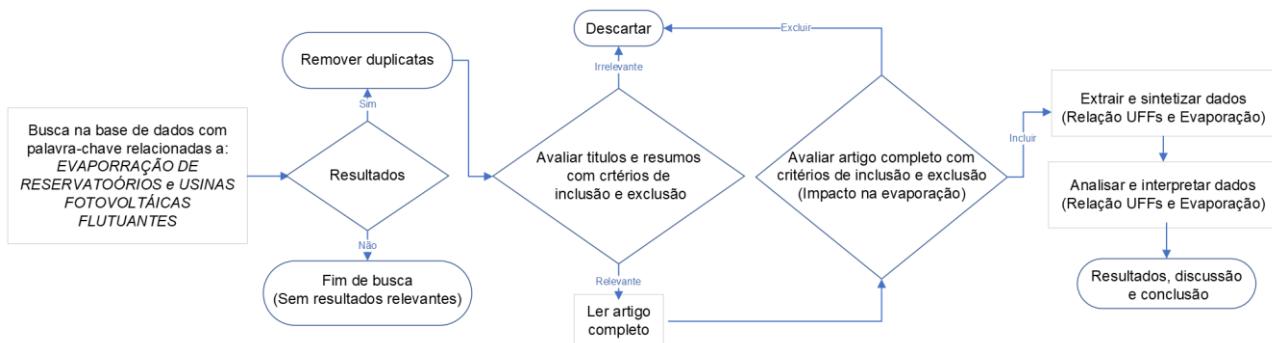
OBJETIVOS

O objetivo deste artigo de revisão é sintetizar e analisar os estudos que investigam a influência da cobertura de FPVs sobre a evaporação da água, buscando identificar lacunas e proporcionar uma base para futuros estudos na área.

MATERIAIS E MÉTODOS

A investigação foi baseada em uma revisão da literatura realizado nas bases de das plataformas *Scientific Electronic Library Online*, *Scopus*, *Google Scholar*, *Web of Science* e *Science Direct*, etc. A pesquisa foi caracterizada segundo as classificações metodológicas estabelecidas por Gil (2022), Lopes, Bouzon e Carneiro Neto (2024). A pesquisa é de cunho exploratória e qualitativa, de acordo com Gil (2022), esse tipo de pesquisa proporciona familiarização com o problema, proporcionando construção de hipóteses. Buscando identificar padrões, desafios e oportunidades no contexto do processo de evaporação e FPVs. A Figura 1 mostra o fluxograma do processo de busca de documentos.

Figura 1 – Fluxograma do processo metodológico



A seleção dos documentos foi realizada a partir de uma string de busca cuidadosamente elaborada, que contemplava termos diretamente relacionados à questão de pesquisa. A string de busca utilizada foi: *usinas flutuantes fotovoltaicas OR energia solar flutuante OR floating solar OR floating FPV AND (evaporação OR perda de água OR water loss) AND (redução OR impacto OR efeito)*. As seguintes palavras-chave foram empregadas na busca: usinas flutuantes fotovoltaicas, energia solar flutuante, evaporação, perda de água, conservação de água, *floating solar*, *floating FPV*, *evaporation*, *water loss*, *water conservation*, *impact*, *effect*, *reduction*, *reservoirs*, *lakes*, *dams*. Essa combinação de palavras-chave visou filtrar estudos que abordassem a gestão da qualidade no contexto da integração tecnológica e da transformação digital na indústria.

A busca resultou em um total de 70 documentos, no período de 2019 a 2025, que foram submetidos a critérios de inclusão e exclusão específicos para garantir a relevância e a qualidade dos estudos selecionados. Os critérios de inclusão e exclusão foram estabelecidos para refinar os resultados da busca, assegurando que apenas os documentos mais pertinentes fossem considerados para análise.

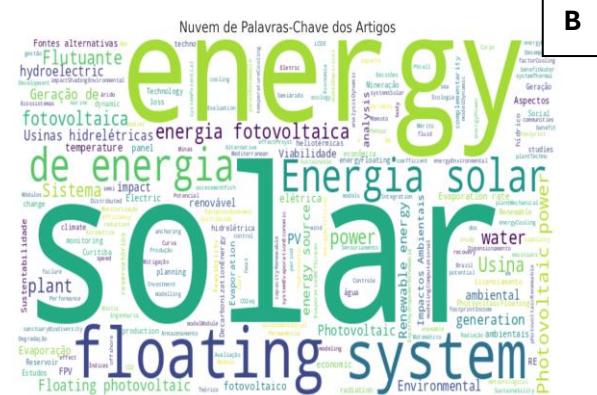
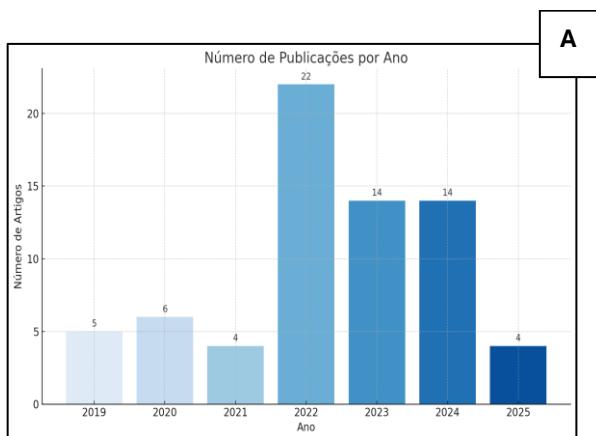
RESULTADOS E DISCUSSÕES

Uma análise bibliométrica sobre tecnologias de FPVs mostra o crescimento expressivo de publicações entre 2020 e 2022 (Figura 2 - A), provavelmente impulsionado pela crise hídrica, secas e expansão da energia solar como alternativa à hidrelétrica. As FPVs se destacam pela integração com reservatórios e potencial de reduzir a evaporação hídrica, estimulando estudos sobre sua viabilidade e impactos. No ano de 2014, temos os primeiros trabalhos publicados sobre o assunto (Schultz, 2014) aplicado ao Brasil e em 2007 internacionalmente (Allison et al. 2007). As Universidades UTFPR, UFPR, UFPB, UFCG e a empresa CHESF, refletindo a força de universidades e centros regionais na pesquisa, especialmente no Nordeste, através de parcerias e redes como o INCT Energias Renováveis.

A rede de coautoria revela núcleos de colaboração consolidados, com autores como Guimarães A., Du S., Liang C., Sun H. e Wang K. exercendo liderança, embora a cooperação interinstitucional ainda seja incipiente. As fontes de publicação predominam em eventos e periódicos técnicos, indicando o caráter aplicado e em consolidação da área, mas também há interesse em abordagens territoriais e socioambientais. Isso sugere a necessidade de fortalecer a publicação em periódicos internacionais para maior visibilidade.

Por fim, a análise da nuvem de palavras (Figura 2 - B) indica um foco majoritário na produção de energia solar, com a evaporação como tema secundário. Apesar de estudos como Barros et al. (2020) demonstrarem o potencial das FPVs na redução da perda hídrica, isso ainda é tratado como um efeito colateral, ressaltando a necessidade de aprofundar investigações sobre os impactos hidrológicos para uma gestão integrada de água e energia.

Figura 2 – Análise bibliométrica sobre tecnologias FPVs



A análise da literatura sobre FPVs e seus efeitos na evaporação em reservatórios revela que, apesar do crescente interesse, a compreensão dos fenômenos e a avaliação do potencial de ampliação da tecnologia ainda são fragmentadas. A pesquisa existente demonstra lacunas significativas em modelagem integrada, estudos de longo prazo e em larga escala, bem como na análise contextualizada de viabilidade e nos aspectos metodológicos.

Os estudos empregam modelos matemáticos e softwares de simulação para estimar e prever fenômenos, como a evaporação da água e a geração de energia. Há também metodologia que não usa software comercial, mas análise gráfica da Curva de Duração de Cheias (FDC), para dimensionamento de FPVs com Coleta e Análise de Dados Empíricos/Experimentais, baseando-se em medições e observações de campo ou laboratório, como apresentado no Quadro 1 em anexo.

Aprimorar os modelos de FPVs é um imperativo, visto que muitos estudos se concentram em aspectos isolados. Por exemplo, enquanto a evaporação é investigada separadamente (Sanches et al., 2023), a presença de FPVs altera o balanço térmico do reservatório, influenciando o armazenamento de calor e, consequentemente, a evaporação (Ferreira et al., 2024). Essa interação é bidirecional: o corpo d'água pode resfriar os módulos, melhorando sua eficiência (Du et al., 2022), e os painéis modificam o balanço energético superficial do reservatório. A literatura, frequentemente, não captura essa interdependência de forma robusta. Ferramentas de simulação energética como o PVsyst (Oliveira-Pinto e Stokkermans, 2020; Kowsar et al., 2022) tipicamente focam na produção técnica e viabilidade econômica, sem aprofundar na modelagem da evaporação, o que ressalta a necessidade de modelos que simulem essa complexidade para otimizar os benefícios conjuntos de redução de evaporação e geração de energia.

A compreensão dos impactos de longo prazo e em larga escala das FPVs constitui outra lacuna proeminente. Embora estudos como o de Prandini et al. (2025) realizem monitoramentos de alta frequência de parâmetros ambientais cruciais (temperatura do ar, módulos e água; oxigênio dissolvido; radiação fotossinteticamente ativa), a quantificação direta do impacto dessas usinas na taxa de evaporação do reservatório ainda é incipiente. Essa limitação é central para a proposta deste artigo de revisão. Revisões globais (Silva et al., 2022; Siqueira et al., 2022) e análises regionais (Silva et al., 2022) consistentemente apontam para a carência de dados de longo prazo e a necessidade de mais estudos em diversas escalas para uma avaliação completa dos benefícios em grande escala.

Apesar da variedade de metodologias de estimativa de evaporação, há uma lacuna notável na discussão sobre sua adaptação e precisão sob FPVs. A complexidade na obtenção de dados (Sanches et al., 2023) e a aplicação de metodologias sem o contexto das FPVs (Rodrigues et al., 2019) reforçam a necessidade de técnicas adaptadas e validadas para este ambiente. A heterogeneidade das abordagens e a carência de dados padronizados dificultam a comparabilidade e generalização dos resultados. Uma padronização na coleta de dados (inspirada no rigor do monitoramento de alta frequência, como o de Prandini et al., 2025) e nas métricas de avaliação é crucial para avançar na pesquisa e permitir a formulação de diretrizes robustas.

A viabilidade de projetos FPV, incluindo o benefício da redução da evaporação, é fortemente dependente das condições climáticas, hidrológicas e socioeconômicas locais. Embora estudos de viabilidade em hidrelétricas brasileiras (Stefeni e Barcik, 2022; Silva et al., 2021) validem a relevância de análises contextualizadas, a integração da valoração da água economizada nas análises econômicas é crucial para uma avaliação abrangente e para justificar investimentos, especialmente em regiões de estresse hídrico no Brasil (Kowsar et al., 2022; Stefeni e Barcik, 2022). A variabilidade dos benefícios em diferentes climas e a complexidade na obtenção de informações básicas sobre evaporação em diversas regiões brasileiras (Sanches et al., 2023) sublinham a necessidade de análises multicritério específicas e mapeamentos de potencial (Santos et al., 2022). O Quadro 2 em anexo, apresenta as demandas principais identificadas na literatura, para a ampliação das FPVs no Brasil, podem ser abordadas com ferramentas e metodologias específicas.

CONCLUSÃO

A análise bibliográfica realizada confirmou o crescente interesse científico nas FPVs como uma solução promissora para os desafios hídricos e energéticos. Evidenciou-se que a capacidade das FPVs de mitigar perdas por evaporação em reservatórios, aliada à geração de energia limpa, confere-lhes um valor estratégico, especialmente em regiões de estresse hídrico. Contudo, está revisão sistemática identificou lacunas que limitam a plena ampliação das FPVs. Notou-se uma fragmentação na modelagem, onde a complexa interação bidirecional entre as FPVs e o balanço hídrico/térmico dos reservatórios ainda é insuficientemente abordada.

Em alinhamento com as lacunas identificadas, e visando aprofundar o conhecimento sobre a modelagem da evaporação em reservatórios com FPVs, o presente trabalho será complementado por uma futura pesquisa dedicada à análise detalhada das metodologias e equações de estimativa de evaporação presentes na literatura revisada. Este novo estudo buscará investigar criticamente as abordagens empregadas pelos autores, avaliando sua aplicabilidade, precisão e adaptabilidade ao contexto de reservatórios com FPVs, bem como a potencial integração dessas equações em modelos mais abrangentes. Essa análise sistemática das metodologias existentes será fundamental para subsidiar o desenvolvimento de ferramentas mais precisas e contextualizadas, essenciais para o planejamento e ampliação estratégica das FPVs no Brasil.

Paralelamente, há uma carência de estudos de longo prazo e em larga escala que quantifiquem de forma abrangente os impactos das FPVs na evaporação e no ambiente aquático. A heterogeneidade metodológica e a falta de padronização na coleta de dados representam desafios adicionais à comparabilidade e generalização dos resultados. Para impulsionar a adoção das FPVs, a pesquisa futura deve focar em análises de viabilidade multicritério que integrem não apenas os aspectos técnicos e econômicos, mas também a valoração da água economizada, a aceitação social e o arcabouço político-regulatório. Essa abordagem é vital para o contexto brasileiro, considerando suas particularidades climáticas e socioeconômicas.

Em síntese, as FPVs devem ser reconhecidas e avaliadas como componentes estratégicos de uma gestão integrada de recursos hídricos e energéticos. Sua ampliação sustentável demanda uma visão abrangente que transcenda a análise puramente energética, incorporando os benefícios hidrológicos e ambientais, os riscos de integridade e superando as barreiras identificadas na literatura. Este estudo, ao sintetizar o conhecimento atual e destacar as principais lacunas, visa a subsidiar futuras pesquisas e o desenvolvimento de políticas públicas para o aproveitamento máximo do potencial das FPVs no Brasil.

REFERENCIAS

- ABSOLAR (2023). Panorama da energia solar no Brasil. São Paulo: Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica.
- BARROS, M. T.; MOREIRA, D. R.; CASTRO, C. M. (2020). “Floating photovoltaic systems: benefits and constraints for water-energy nexus in semiarid regions”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 134, 110276.
- CAPES (2022). Avaliação Quadrienal 2017–2020: Relatório de Programas Acadêmicos – Área de Engenharias III. Brasília: Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior.

CHESF (2021). Projeto piloto de energia solar flutuante no Lago de Sobradinho. Companhia Hidrelétrica do São Francisco. Relatório Técnico Interno.

CNPq (2023). Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Energias Renováveis – INCT-ER. Plataforma Lattes.

DASZKIEWICZ, P. (2020). “Photovoltaic floating panels as a tool of decarbonisation policy”. *Renewable Energy and Environmental Sustainability*, 5(6), pp. 1–7.

DU, S.; LIANG, C.; SUN, H.; WANG, K.; WANG, J.; LI, H.; XUE, J.; CHEN, F.; TUO, J.; DISSE, M.; ZHANG, W. (2024). Evaluating the potential benefits of float solar photovoltaics through the water footprint recovery period, *Journal of Cleaner Production*, Volume 446. 141399, ISSN 0959-6526. <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141399>>.

FERREIRA, E. M.; BUENO, R; DE C; GOULART, C. B; FERNANDES, C. V. S.; BLENINGER, T. (2024). Influência da capacidade de armazenamento de calor nas estimativas de evaporação de lagos. Simpósio Nacional de FluHidros Mecânica dos Fluidos e Hidráulica. XXV SBRH - Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos

FRIEDRICH, K.; HOLLER, J.; SCHMIDT, M. (2018). “Evaporation from reservoirs in arid and semi-arid regions: A review and the way forward”. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(1), pp. 63–75.

GIL, A. C. (2022). Como Elaborar Projetos de Pesquisa. 7th ed. São Paulo: Grupo Gen.

INPE (2017). Atlas Brasileiro de Energia Solar. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. São José dos Campos: INPE.

IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (2024). *Sixth Assessment Report – Synthesis Report*. Geneva: IPCC, 147 p.

LIMA, A. R.; COSTA, D. M.; NASCIMENTO, J. F. (2022). “Uso de reservatórios públicos para geração fotovoltaica flutuante no semiárido brasileiro”. in Anais do Congresso Brasileiro de Energia Solar – CBENS, São Paulo, Nov. 2022, 1, pp. 215–228.

LOPES, E. DE J., LIMA, L. S. DA S., BONILLA, M. A. M., & BOUZON, M. (2024). Systematic Review of the Circular Economy Performance Assessment System Under International Management Paradigms. *Revista De Gestão Social E Ambiental*, 18(9), e05664. <https://doi.org/10.24857/rgsa.v18n9-013>

LOPES, L. B.; PEREIRA, F. M.; OLIVEIRA, A. S. (2022). “Modelagem hidrológica de reservatórios com sistemas fotovoltaicos flutuantes”. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 27(1), pp. 1–13.

MARTINS, J. A.; SOARES, J. D.; BRAGA, C. C. (2023). “Long-term trends in drought severity and frequency in Brazil”. *Geophysical Research Letters*, 50(6), e2023GL100123.

NEWMAN, M. E. J. (2004). “Coauthorship networks and patterns of scientific collaboration”. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 101(Suppl 1), 5200–5205.

OLIVEIRA, R. A.; MORAIS, M. M.; LIMA, A. M. (2023). "Hydrological droughts and hydropower risk in Brazil". *Water*, 15(2), 137.

KOWSAR, A.; HASSAN, M.; RANA, M.T.; HAQUE, N.; FARUQUE, M.H.; AHSAN, S.; ALAM, F. (2023). Optimization and techno-economic assessment of 50 MW floating solar power plant on Hakaluki marsh land in Bangladesh. *Renewable Energy*. V. 216. ISSN 0960-1481. <<https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.119077>>.

OLIVEIRA-PINTO, S.; STOKKERMANS, J. (2020). Assessment of the potential of different floating solar technologies – Overview and analysis of different case studies. *Energy Conversion and Management*. V. 211. ISSN 0196-8904. <<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.112747>>

PRANDINI, M. K., BUENO, R. D. C., RIGOTTI, J. A. (2025). High frequency monitoring for impact assessment of temperature, oxygen and radiation in floating photovoltaic system. *Sci Rep* 15, 19719. <<https://doi.org/10.1038/s41598-025-96257-3>>.

ALHASSAN, M. O.; OPOKU, R.; UBA, F.; OBENG, G. Y.; SEKYERE, C. K.K.; NYANOR, P. (2023). Techno-economic and environmental estimation assessment of floating solar PV power generation on Akosombo dam reservoir in Ghana. *Energy Reports*, V. 10. Pages 2740-2755, ISSN 2352-4847. <<https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.09.073>>

ONS – OPERAÇÃO NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO (2024). *Boletim Mensal de Geração*. Brasília: ONS, 45 p.

ROSA-CLOT, M. (2020). *Floating PV Plants: Design and Operation*. Academic Press, 290 p.

RODRIGUES, I. S.; COSTA, C. A. G.; TEIXEIRA, A. DO S., DE ARAÚJO, J. C. (2019). Estimativa De Evaporação Do Reservatório Gavião (Ce) Através De Modelo Simplificado Utilizando Sensoriamento Remoto. IV Simpósio Brasileiro de Recursos Naturais do Semiárido – SBRNS. "Semiárido e Sociedade: sustentabilidade para gerações futuras".

SANCHES, F. DE O.; FRAUCHES, M. DA S.; FERREIRA, C. DE C. M.; VIANNA, Y. C. G.; OLIVEIRA, T. A. (2023). Evaporação Em Reservatórios Hídricos: Uma Revisão De Métodos/Técnicas Empíricas. *Revista Do Departamento De Geografia* (Universidade de São Paulo). V. 43. (eISSN): 2236-2878. 10.11606/eISSN.2236-2878.rdg.2023.209203>.

SANTOS, B. K. L.; FERREIRA, E. M.; BUENO, R. DE C.; GOULART, C. B.; FERNANDES, C. V. S.; BLENINGER, T. B. (2023). Diferença entre métodos de cálculo global e modelagem 3D de evaporação de lagos e reservatórios. XVI Encontro Nacional De Engenharia De Sedimentos. Abrhidro. ISSN: 2318-0358.

SILVA, R. A.; OLIVEIRA, C. L.; FREITAS, A. G. (2023). "Potencial técnico de sistemas fotovoltaicos flutuantes em reservatórios brasileiros". *Revista de Energias Renováveis*, 18(2), pp. 55–72.

SILVA, D. D.; CARDOSO, E. M.; BASQUEROTTO, C.; PEREIRA, J. A.; TURRA, A.E.; FELDHAUS, J. (2023). Outlook on the Brazilian scenario of floating photovoltaic solar energy.

Energy Reports. V. 10. p. 4429-4435. ISSN 2352-4847.
<<https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.11.004>>.

SIQUEIRA, D. C. S. de; SOUSA, V. D. de A.; LESS, D. F. da S. (2022). Floating photovoltaic system, main obstacles and implementation challenges in Brazil: a literature review. Research, Society and Development, [S. l.], v. 11, n. 1, p. e45311125084, 2022. DOI: 10.33448/rsd-v11i1.25084. Disponível em: <https://rsdjurnal.org/index.php/rsd/article/view/25084>. Acesso em: 17 jun. 2025.

STEFENI, W. E. (2022). Estudo De Viabilidade Técnica E Financeira Da Hibridização De Pequenas Centrais Hidrelétricas E Usinas Fotovoltaicas Flutuantes. Trabalho De Conclusão De Curso De Graduação. Engenharia Elétrica Da Universidade Tecnológica Federal Do Paraná, Curitiba.

UTFPR (2023). Plano de Desenvolvimento Institucional 2023–2027. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba: UTFPR.

WAGNER, C. S. (2018). *The Collaborative Era in Science: Governing the Network*. Palgrave Macmillan, 186 p.

WERNER, C.; LAZARO, P. (2023). “Renewable energy policies in the Global South: trends, limits, and opportunities”. *Energy Policy*, 172(113304), pp. 1–11.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES), junto ao Prof. Dr. Tobias Bleninger, agradecemos o apoio da bolsa de produtividade do Conselho Nacional de Pesquisa (CNPq), processo: 313491/2023-2, edital: no. 09/2023.

ANEXOS

Quadro 1 – Metodologias Utilizadas nos estudos de FPVs de 2019 a 2025.

Modelagem e Simulação Numérica	<p>Algoritmo SEBAL, Balanço-Razão de Bowen, Penman-Monteith (adaptado/simplificado), Priestley-Taylor/De Bruin & Keijman, Dalton, Linacre, Tanque Classe "A", METRIC, Kohler, Complementary Relationship Areal Evapotranspiration/Complementary Relationship Lake Evaporation - CRAE/CRLE e Thornthwaite/Thornthwaite e Mather e Thorthwaite modificado por Camargo: Utilizados para estimativas de evaporação em reservatórios (Sanches et al., 2023).</p> <p>Equação de Linacre (1977) com imagens Landsat 8: Para estimar a lâmina de evaporação diária (Rodrigues et al., 2019).</p> <p>Programa Computacional CASCATA (Sagbah 2000): Para simular cenários e avaliar a influência da evaporação na disponibilidade hídrica em reservatórios (Fontes et al., 2022).</p> <p>Programa Computacional CASCATA (Sagbah 2000): Para simular cenários e avaliar a influência da evaporação na disponibilidade hídrica em reservatórios (Silva et al., 2023).</p> <p>QGIS: Para localizar corpos d'água e cruzar dados meteorológicos georreferenciados na avaliação de potencial de FPVs e para avaliar o potencial de FPVs (Rosa-Clot, 2020; Silva et al., 2023).</p> <p>Modelos matemáticos para cálculo de geração de energia e capacidade instalada de FPVs e para avaliar o potencial de FPVs (Silva et al., 2023)</p> <p>Modelos empíricos (e.g., Penman) e fórmulas simplificadas: Para estimar a evaporação e temperatura da superfície da água. Modelo de Penman (1948) e modelo hidrodinâmico 3D (DELFT3D-FLOW): Para analisar a evaporação em reservatórios (Rosa-Clot, 2020; Werner et al., 2023).</p> <p>Software PVsyst, Global Solar Atlas 2.0 e Electrical Transient and Analysis Program (ETAP): Para planejamento, simulação e modelagem de sistemas FPV; Software RETScreen Expert: Para análise de viabilidade técnico-econômica de sistemas FPV-Hidro; System Advisor Model (SAM): Para cálculos e informações técnicas em estudos de caso (Mahidin et al., 2021; Bogdan et al., 2022; Koondhar et al., 2024).</p>
---------------------------------------	--

	<p>Modelagem da proliferação de algas (clorofila-a) (Robalo-Cabrera et al., 2024).</p> <p>Dados de cota x área x volume do reservatório: Para calcular a vazão equivalente à lâmina evaporada e o volume perdido mensalmente (Friedrich et al. 2024).</p> <p>Engineering Equation Solver (EES): Para simulação do desempenho de geradores fotovoltaicos (Alonso et al., 2025).</p>
Coleta e Análise de Dados Empíricos/Experimentais	Medidas de atmômetro de Piche: Para validar resultados de estimativa de evaporação (Yang et al., 2021).
	Dados meteorológicos (temperatura, umidade, velocidade do vento, radiação solar): Para estimar a evaporação (Truong et al., 2021).
	Sensores capacitivos personalizados: Para medir o conteúdo de água em colunas de laboratório (Aderonke et al. 2022).
	Monitoramento de alta frequência de temperatura, oxigênio dissolvido (OD) e radiação fotossinteticamente ativa (PAR): Em sistemas FPV instalados em reservatórios (Youssef et al., 2024).
	Coleta de dados de geração de energia e temperatura de sistemas fotovoltaicos: Para calcular e analisar índices de mérito (Rocha et al., 2024).
	Análise Técnico-Econômica: Inclui avaliação de custos de investimento, operação e manutenção, retorno sobre o investimento, e custo nivelado de energia (LCOE) (De França et al., 2022).

Quadro 2 – Demandas identificadas na literatura para ampliação de FPVs

Demandas	Necessidade	Área de Estudos	Ferramentas e Metodologias Sugeridas	Resultados Esperados	Fundamentação
Modelagem Integrada e a Complexidade das Interações	Desenvolver modelos que capturem a bidirecionalidade	Foco em reservatórios artificiais (hidrelétricos e de	Modelagem Hidrodinâmica e Termodinâmica (Ex: Delft3D):	Modelos computacionais validados capazes de prever com precisão os	Abordar a segmentação de estudos (Sanches et al., 2023; Kowsar et al., 2022) e a complexidade das interações

Hídrico-Energéticas	<p>da interação térmica entre FPVs e reservatórios, otimizando tanto a redução da evaporação quanto o desempenho energético dos painéis.</p>	<p>abastecimento) no Brasil, selecionados como estudos de caso representativos de diferentes regimes climáticos e usos da água. Simulações em cenários hipotéticos de cobertura por FPVs.</p>	<p>Essencial para simular em 3D as alterações no balanço térmico do reservatório (devido ao sombreamento e resfriamento), estratificação da água e seu impacto na evaporação. Permite acoplar módulos de qualidade da água para avaliar outros impactos.</p>	<p>benefícios duplos da FPV (economia hídrica e ganho de energia) e os impactos ambientais (ex: temperatura da água, oxigênio dissolvido) em diferentes cenários de projeto.</p>	<p>térmicas (Ferreira et al., 2024; Du et al., 2022) exige ferramentas que modelem esses múltiplos fenômenos simultaneamente.</p>
----------------------------	--	---	--	--	---

			Balanço de Energia na Superfície da Água: Refinamento de equações de balanço de energia que considerem a redução da radiação solar e do vento sob os painéis.		
Desafios do Longo Prazo e da Escala: A Carência de Dados Empíricos e Projeções	Superar a limitação de dados de longo prazo e em larga escala para avaliar os impactos acumulados e a generalização dos benefícios das FPVs.	Reservatórios de grande e médio porte em diversas bacias hidrográficas brasileiras, incluindo aqueles com históricos de estresse hídrico. Análise de séries temporais de dados climáticos e hidrológicos.	Sensoriamento Remoto (Ex: Dados de Satélite CBERS, Landsat, Sentinel): Para mapeamento de grandes áreas de reservatórios, monitoramento de mudanças de temperatura da superfície da água ao longo do tempo e identificação de padrões de cobertura. Permite	Compreensão robusta dos impactos de longo prazo e em larga escala das FPVs, incluindo a quantificação da economia hídrica e os efeitos no desempenho dos painéis ao longo de décadas, subsidiando o planejamento estratégico.	As revisões (Silva et al., 2022; Siqueira et al., 2022) e análises regionais (Silva et al., 2021) apontam consistentemente para a lacuna de dados e análises em grande escala e de longo prazo.

			<p>a análise em "larga escala".</p> <p>Monitoramento de Alta Frequência de Campo: Instalação de estações de monitoramento in situ (Prandini et al., 2025) para coleta contínua de dados climáticos (temperatura, umidade, vento, radiação) e hidrológicos (temperatura da água em diferentes profundidades, oxigênio dissolvido, nível d'água) para a "validação" de modelos e quantificação de impactos diretos.</p> <p>Séries Históricas de Dados (Ex: Relatório ANA</p>		
--	--	--	--	--	--

			2021, INMET): Fornecem o contexto histórico de evaporação (ANA, 2021) e condições climáticas, essenciais para projeções de "longo prazo" e para calibrar modelos.		
Lacunas Metodológicas na Medição e Adaptação para FPVs	Desenvolver e adaptar metodologias precisas para medir a evaporação e outros parâmetros ambientais especificamente sob FPVs, e padronizar a coleta de dados para comparabilidade.	Reservatórios específicos onde projetos de FPVs já existam ou possam ser instalados para fins de pesquisa, permitindo a instalação de instrumentação dedicada. Ambientes controlados para experimentação (tanques-piloto).	Técnicas de Micrometeorologia (Ex: Eddy Covariance adaptado): Embora complexas, são consideradas o padrão ouro para medir o fluxo de evapotranspiração e poderiam ser adaptadas para medição de evaporação sob FPVs.	Metodologias de medição de evaporação e parâmetros ambientais validadas para ambientes com FPVs, além de protocolos padronizados de coleta de dados que permitam análises comparativas e aprimorem a acurácia dos modelos.	A complexidade da disponibilidade de dados e a aplicação de metodologias sem o contexto FPV (Sanches et al., 2023; Rodrigues et al., 2019) exigem a adaptação e padronização dessas técnicas de medição, inspirandose no rigor de estudos como o de Prandini et al. (2025).

			<p>Sensores Térmicos e de Radiação Subaquáticos: Para entender o balanço de energia e as variações de temperatura da água sob e ao redor dos módulos.</p>		
			<p>Adaptação e Validação de Equações de Evaporação (Ex: Equações do Relatório ANA 2021, Penman-Monteith): Ajustar e validar as equações existentes com dados de campo coletados sob FPVs para refletir o novo microclima.</p>		
Viabilidade Multicritério e a Valoração da Água no	Conduzir análises de viabilidade que considerem não	Regiões e reservatórios com diferentes perfis socioeconômicos,	Análise Econômica e Financeira: Incluir indicadores	Avaliações de viabilidade robustas e contextualizadas para projetos FPV no Brasil,	A variabilidade dos benefícios (Nogueira et al., 2022) e a necessidade de análises contextualizadas (Stefeni e

Cenário Brasileiro	<p>apenas os aspectos técnicos e econômicos, mas também a valoração da água economizada, os impactos sociais e a arcabouço regulatório em contextos brasileiros específicos.</p>	<p>regimes hídricos (incluindo semiárido) e potencial de conflito de uso da água no Brasil.</p>	<p>tradicionalis (VPL, TIR, Payback) e, crucialmente, a valoração monetária da água economizada (considerando custos de tratamento, de escassez hídrica, etc.).</p>	<p>fornecendo subsídios para políticas públicas que reconheçam e valorizem os múltiplos benefícios da tecnologia, facilitando sua ampliação.</p>	<p>Barcik, 2022; Silva et al., 2021) demandam uma abordagem multicritério que integre a valoração da água e aspectos socio-regulatórios para impulsionar a ampliação no Brasil.</p>
			<p>Sistemas de Informação Geográfica (SIG): Para integrar dados de potencial, dados climáticos, de reservatórios, de infraestrutura e socioeconômicos para análises de viabilidade espacializadas.</p>		
			<p>Pesquisa Social (Qualitativa e quantitativa): Entrevistas, questionários e</p>		

			<p>grupos focais com comunidades locais e stakeholders para avaliar a aceitação social e identificar preocupações (como sugerido em estudos sobre barreiras, ex: Bueno et al., 2022).</p> <p>Análise de Políticas Públicas e Regulatórias: Revisão crítica da legislação vigente e proposição de marcos regulatórios que incentivem o duplo benefício da FPV (energia e água) (Santos et al., 2022).</p>		
--	--	--	--	--	--

Demanda	Necessidade	Área de Estudos	Ferramentas e Metodologias Sugeridas	Resultados Esperados	Fundamentação
Modelagem Integrada e a Complexidade das Interações Hídrico-Energéticas	Desenvolver modelos que capturem a bidirecionalidade da interação térmica entre FPVs e reservatórios, otimizando tanto a redução da evaporação quanto o desempenho energético dos painéis.	Foco em reservatórios artificiais (hidrelétricos e de abastecimento) no Brasil, selecionados como estudos de caso representativos de diferentes regimes climáticos e usos da água. Simulações em cenários hipotéticos de	Modelagem Hidrodinâmica e Termodinâmica (Ex: Delft3D): Essencial para simular em 3D as alterações no balanço térmico do reservatório (devido ao sombreamento e resfriamento), estratificação da água e seu impacto na evaporação. Permite acoplar módulos de qualidade da água	Modelos computacionais validados capazes de prever com precisão os benefícios duplos da FPV (economia hídrica e ganho de energia) e os impactos ambientais (ex: temperatura da água, oxigênio dissolvido) em diferentes cenários de projeto.	Abordar a segmentação de estudos (Sanches et al., 2023; Kowsar et al., 2022) e a complexidade das interações térmicas (Ferreira et al., 2024; Du et al., 2022) exige ferramentas que modelem esses múltiplos fenômenos simultaneamente.

		<p>cobertura por FPVs.</p> <p>para avaliar outros impactos.</p>		
		<p>Modelos de Desempenho Fotovoltaico: Integrar com os modelos hidrodinâmicos para simular a eficiência dos painéis sob as temperaturas da água e do ar influenciadas pela FPV.</p>		
		<p>Balanço de Energia na Superfície da Água: Refinamento de equações de balanço de energia que considerem a redução da radiação solar e do vento sob os painéis.</p>		

<p>Desafios do Longo Prazo e da Escala: A Carência de Dados Empíricos e Projeções</p>	<p>Superar a limitação de dados de longo prazo e em larga escala para avaliar os impactos acumulados e a generalização dos benefícios das FPVs.</p>	<p>Reservatórios de grande e médio porte em diversas bacias hidrográficas brasileiras, incluindo aqueles com históricos de estresse hídrico. Análise de séries temporais de dados climáticos e hidrológicos.</p>	<p>Sensoriamento Remoto (Ex: Dados de Satélite CBERS, Landsat, Sentinel): Para mapeamento de grandes áreas de reservatórios, monitoramento de mudanças de temperatura da superfície da água ao longo do tempo e identificação de padrões de cobertura. Permite a análise em "larga escala".</p>	<p>Compreensão robusta dos impactos de longo prazo e em larga escala das FPVs, incluindo a quantificação da economia hídrica e os efeitos no desempenho dos painéis ao longo de décadas, subsidiando o planejamento estratégico.</p>	<p>As revisões (Silva et al., 2022; Siqueira et al., 2022) e análises regionais (Silva et al., 2021) apontam consistentemente para a lacuna de dados e análises em grande escala e de longo prazo.</p>
--	---	--	---	--	--

			<p>radiação) e hidrológicos (temperatura da água em diferentes profundidades, oxigênio dissolvido, nível d'água) para a "validação" de modelos e quantificação de impactos diretos.</p> <p>Séries Históricas de Dados (Ex: Relatório ANA 2021, INMET): Fornecem o contexto histórico de evaporação (ANA, 2021) e condições climáticas, essenciais para projeções de "longo prazo" e para calibrar modelos.</p>	
--	--	--	--	--

Lacunas Metodológicas na Medição e Adaptação para FPVs	<p>Desenvolver e adaptar metodologias precisas para medir a evaporação e outros parâmetros ambientais especificamente sob FPVs, e padronizar a coleta de dados para comparabilidade.</p>	<p>Reservatórios específicos onde projetos de FPVs já existam ou possam ser instalados para fins de pesquisa, permitindo a instalação de instrumentação dedicada.</p> <p>Ambientes controlados para experimentação (tanques-piloto).</p>	<p>Técnicas de Micrometeorologia (Ex: Eddy Covariance adaptado): Embora complexas, são consideradas o padrão ouro para medir o fluxo de evapotranspiração e poderiam ser adaptadas para medição de evaporação sob FPVs.</p> <p>Sensores Térmicos e de Radiação Subaquáticos: Para entender o balanço de energia e as variações de temperatura da água sob e ao redor dos módulos.</p> <p>Adaptação e Validação de Equações de Evaporação (Ex:</p>	<p>Metodologias de medição de evaporação e parâmetros ambientais validadas para ambientes com FPVs, além de protocolos padronizados de coleta de dados que permitam análises comparativas e aprimorem a acurácia dos modelos.</p>	<p>A complexidade da disponibilidade de dados e a aplicação de metodologias sem o contexto FPV (Sanches et al., 2023; Rodrigues et al., 2019) exigem a adaptação e padronização dessas técnicas de medição, inspirandose no rigor de estudos como o de Prandini et al. (2025).</p>
---	--	--	---	---	--

			Equações do Relatório ANA 2021, Penman-Monteith): Ajustar e validar as equações existentes com dados de campo coletados sob FPVs para refletir o novo microclima.		
Viabilidade Multicritério e a Valoração da Água no Cenário Brasileiro	Conduzir análises de viabilidade que considerem não apenas os aspectos técnicos e econômicos, mas também a valoração da água economizada, os impactos sociais e a arcabouço regulatório em contextos brasileiros específicos.	Regiões e reservatórios com diferentes perfis socioeconômicos, regimes hídricos (incluindo semiárido) e potencial de conflito de uso da água no Brasil.	Análise Econômica e Financeira: Incluir indicadores tradicionais (VPL, TIR, Payback) e, crucialmente, a valoração monetária da água economizada (considerando custos de tratamento, de escassez hídrica, etc.).	Avaliações de viabilidade robustas e contextualizadas para projetos FPV no Brasil, fornecendo subsídios para políticas públicas que reconheçam e valorizem os múltiplos benefícios da tecnologia, facilitando sua ampliação.	A variabilidade dos benefícios (Nogueira et al., 2022) e a necessidade de análises contextualizadas (Stefeni e Barcik, 2022; Silva et al., 2021) demandam uma abordagem multicritério que integre a valoração da água e aspectos socio-regulatórios para impulsionar a ampliação no Brasil.

		<p>Geográfica (SIG): Para integrar dados de potencial, dados climáticos, de reservatórios, de infraestrutura e socioeconômicos para análises de viabilidade espacializadas.</p> <p>Pesquisa Social (Qualitativa e quantitativa): Entrevistas, questionários e grupos focais com comunidades locais e stakeholders para avaliar a aceitação social e identificar preocupações (como sugerido em estudos sobre barreiras, ex: Bueno et al., 2022).</p> <p>Análise de Políticas Públicas e</p>		
--	--	---	--	--

			<p>Regulatórias: Revisão crítica da legislação vigente e proposição de marcos regulatórios que incentivem o duplo benefício da FPV (energia e água) (Santos et al., 2022).</p>		
--	--	--	--	--	--