


A Review of the Thermal Behavior of Floating Photovoltaic Modules Under Tropical Climates

Antonio W. D. Costa , Leticia O. Santos , and Paulo C. M. Carvalho 

Abstract—This systematic bibliometric review analyzes the thermal performance of Floating Photovoltaic (FPV) systems in tropical and semiarid climates, investigating how environmental factors like solar irradiation, temperature, and wind regime impact FPV efficiency. The study employs a comprehensive literature analysis focusing specifically on thermal behavior challenges in regions where temperatures frequently exceed Standard Test Conditions. Four critical knowledge gaps are identified: insufficient research into long-term performance, cooling mechanisms, thermal modeling, and comparative analyses. The research reveals that FPV installations demonstrate efficiency gains between 3% and 26% compared to conventional PV systems, with passive cooling based on thermal bridges showing the most promising results. Furthermore, studies indicate that wind may influence thermal performance more significantly than water bodies, contradicting common assumptions about water-based cooling benefits. The review also highlights the geographical imbalance in FPV research, with limited studies from Latin America despite its extensive tropical regions. Based on these findings, the paper recommends developing predictive models tailored to tropical environments, establishing standardized thermal performance metrics, and conducting long-term degradation studies to optimize FPV performance in such climatic conditions, ultimately contributing to more efficient renewable energy deployment in tropical regions.

Link to graphical and video abstracts:
<https://latam.ieceer9.org/index.php/transactions/article/view/9624>

Index Terms—Floating Photovoltaics, Tropical Climate, Thermal Performance, Energy Efficiency, Thermal Degradation.

I. INTRODUCTION

O consumo global de energia aumentará em 50% entre 2020 e 2050 [1], [2], reforçando a importância de otimizar tecnologias de geração como os sistemas fotovoltaicos (FV). Nesse contexto, os sistemas fotovoltaicos flutuantes (FVF) têm apresentado crescimento acelerado desde 2010 [3], com projeções de expansão de 22,5% até 2030 [2]. Apesar do maior investimento de capital inicial, aproximadamente 1,2 vezes superior ao de sistemas convencionais [4], os FVF oferecem vantagens em comparação com sistemas terrestres: aumento de eficiência de 11% a 25% devido ao resfriamento causado pela água [5], [4], [6], redução de até 85% no custo nivelado de energia [7], menor uso de terrenos, controle do crescimento de algas e redução na evaporação [8],

[9]–[15]. Como exemplo, uma planta FVF no Reservatório Passaúna, Brasil, com potência de 130 kWp e área de 1.265 m², resultou em uma redução de até 70% na evaporação [16]. No entanto, a implementação dos sistemas FVF em clima tropical enfrenta desafios [17], com as variáveis meteorológicas típicas deste clima impactando a eficiência [18].

Revisões recentes com foco em plantas FVF têm abordado desde a categorização de diferentes arranjos [19], até impactos ambientais e desafios técnico-econômicos [20]. Uma análise de módulos FV refrigerados com água, diferenciando o comportamento térmico entre FVF, subaquáticos, offshore e no topo de canais é apresentada em [21], destacando a influência da temperatura ambiente. A redução da evaporação em reservatórios tropicais é focada em [22] e [16]. O balanço energético de FVF em reservatório tropical é analisado em [16]; e em [23] é apresentada uma revisão sobre sistemas FVF no Egito. Discussões sobre sistemas FVF com foco nos impactos ambientais, técnicos, na qualidade e temperatura da água são apresentadas em [24] e [25], as perspectivas da tecnologia FVF na Ásia Central e do Sul, com foco no Irã, são investigadas em [24]. A viabilidade de mercado e os desafios de implantação dos FVF em países emergentes, mencionando ganhos de eficiência, são o foco em [26]; o foco está na viabilidade de mercado e nos desafios de implantação dos FVF em países emergentes, mencionando ganhos de eficiência devido ao resfriamento, enquanto a confiabilidade, a durabilidade e a contribuição para a redução das emissões de CO₂ são abordadas em [27] e [28].

Diversas lacunas são encontradas na literatura, tal como a necessidade de mais estudos sobre o desempenho FVF a longo prazo [4], [24], [29], [29]–[31], [32], a falta de análises aprofundadas do desempenho térmico [7], [33], [21], [26], [34]–[43], e a necessidade de investigações adicionais sobre o aproveitamento de calor dissipado [44], [45], [46]–[49]. A análise do comportamento térmico dos sistemas FVF, especialmente no que se refere aos mecanismos de resfriamento, modelagem térmica [50] e suas implicações na eficiência, é especialmente crítica para o aprimoramento desses sistemas. Considerando a origem dos trabalhos, uma análise de 300 artigos publicados entre 2013 e 2022 em [51] mostra que a maioria dos estudos sobre sistemas FVF é realizada por equipes principalmente da Europa e Ásia.

Dado o exposto, é observada uma falta de estudos específicos sobre o desempenho térmico FVF, especialmente em ambiente tropical, condição climática típica da América Latina [52]–[54]. Essa limitação impacta a capacidade de previsão e otimização das instalações FVF [55], bem como a durabilidade dos componentes, exigindo um planejamento cuidadoso para

The associate editor coordinating the review of this manuscript and approving it for publication was Pedro Moura (*Corresponding author: Antonio Wellington Dantas da Costa*).

Antonio Wellington Dantas da Costa, L. O. Santos, and P. C. M. Carvalho are with the Federal University of Ceará, Fortaleza, Brazil (e-mails: welldantas@alu.ufc.br, leticia@fisica.ufc.br, and carvalho@dee.ufc.br).

garantir a viabilidade a longo prazo [56]. Nesse contexto, o presente artigo busca suprir essa lacuna ao oferecer uma revisão direcionada ao comportamento térmico de sistemas FVF em ambiente tropical. O foco em plantas FVF em clima tropical se justifica pela necessidade de otimizar o desempenho de tais sistemas em regiões onde as temperaturas frequentemente ultrapassam a estipulada pelas Condições Padrões de Teste (STC - *Standard Test Conditions*) [57]. Assim, o objetivo principal do presente estudo é analisar sistematicamente a literatura sobre sistemas FVF em clima tropical, com ênfase no comportamento térmico e seu impacto no desempenho. Inicialmente, são identificadas e avaliadas metodologias que focam na influência da temperatura e nos mecanismos naturais de resfriamento proporcionados pelo ambiente aquático. Por fim, são analisados os desafios específicos e as perspectivas futuras para a otimização do comportamento térmico de sistemas FVF em ambiente tropical, visando contribuir no desenvolvimento de tecnologias de resfriamento.

O artigo está estruturado em cinco seções: Introdução; Seção II, apresentando a metodologia adotada, incluindo métodos bibliométricos para identificar tendências de pesquisa e lacunas; Seção III, trazendo uma análise das revisões, classificando os desafios e lacunas nas categorias: mecanismos de resfriamento, modelagem térmica, comparação de desempenho e estudos de longo prazo; Seção IV, que apresenta uma análise metodológica e de desempenho dos sistemas FVF sob clima tropical, incluindo comparações entre diferentes tecnologias de resfriamento, seus ganhos de eficiência e limitações técnicas; Seção V, que discute os principais achados; e Seção VI, que reúne as conclusões e recomendações para pesquisas futuras.

II. METODOLOGIA DA ANÁLISE

A metodologia empregada na revisão sistemática adotada é estruturada em três etapas: planejamento, execução e análise dos resultados, conforme ilustrado na Fig. 1. O fluxograma apresenta as interconexões entre as diferentes fases do processo e destaca como cada etapa contribuiu para a identificação das lacunas na literatura sobre sistemas FVF em clima tropical.

Na fase de planejamento, a formulação da pergunta de pesquisa ‘Como o comportamento térmico dos sistemas FVF é afetado pelas condições específicas do clima tropical?’ orientou a definição dos critérios de seleção e exclusão.

Artigos publicados entre 2015-2024 foram selecionados, com foco em clima tropical/semiárido. Foram excluídos artigos que, embora mencionassem FVF, não tinham como objetivo principal o estudo desses sistemas, carecendo de dados quantitativos de desempenho térmico ou concentrando-se em aspectos periféricos.

Para identificar as pesquisas sobre módulos FVF, utilizouse o banco de dados Scopus, escolhido por sua reputação e cobertura ampla de literatura científica. A busca foi realizada utilizando combinações das palavras-chave: ‘floating’, ‘photovoltaic’ e ‘thermal’. A execução envolveu a triagem de 137 artigos potenciais, com leitura integral de 75 trabalhos, que levou à seleção de 31 artigos focados exclusivamente em clima tropical ou semiárido. As lacunas foram identificadas por meio da leitura integral dos artigos, conforme ilustrado na Fig. 1.

O conjunto final de 31 artigos selecionados incluiu 15 pesquisas aplicadas e 16 revisões da literatura, que foram analisadas separadamente. Nossa abordagem metodológica combina análise qualitativa, ao identificar e classificar lacunas conceituais, com análise quantitativa, por meio da extração e comparação de dados térmicos, ganhos de eficiência e parâmetros operacionais presentes nos estudos. Inicialmente, é apresentada a análise dos artigos de revisão, na Seção III, visando o levantamento dos problemas e lacunas relacionados aos sistemas FVF em clima tropical. Em seguida, são apresentados os artigos de pesquisa, na Seção IV, que foram utilizados para desenvolvimento de uma análise metodológica, incluindo estudos das técnicas utilizadas, ganhos e desafios enfrentados por sistemas FVF em clima tropical.

III. DESAFIOS E LACUNAS DE SISTEMAS FVF EM CLIMA TROPICAL

A análise sistemática da literatura sobre sistemas FVF em clima tropical revela desafios e lacunas que precisam ser abordados para otimizar o desempenho desses sistemas. Esta seção apresenta uma síntese dos principais desafios identificados através da leitura dos artigos de revisão selecionados, visando mapear o estado atual do conhecimento e direcionar futuras pesquisas. A distribuição das publicações sobre FVF por continente é apresentada na Fig. 2, evidenciando a concentração na Ásia (75%); América Latina ocupa a segunda posição (17%), com o Brasil como principal centro de pesquisas.

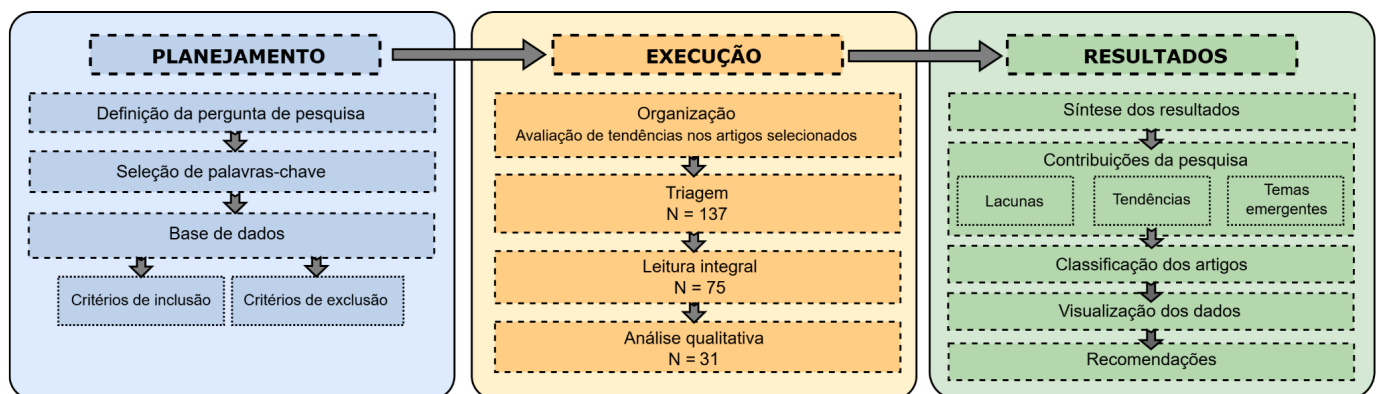


Fig. 1. Fluxograma para o estudo de sistemas FVF em clima tropical.

Para facilitar a compreensão e análise estruturada dos desafios, os estudos foram classificados em quatro categorias: mecanismos de resfriamento, modelagem térmica, comparação de desempenho e estudos de longo prazo. Esta classificação permite uma visão integrada dos diferentes aspectos que influenciam o comportamento térmico dos sistemas FVF em ambiente tropical.

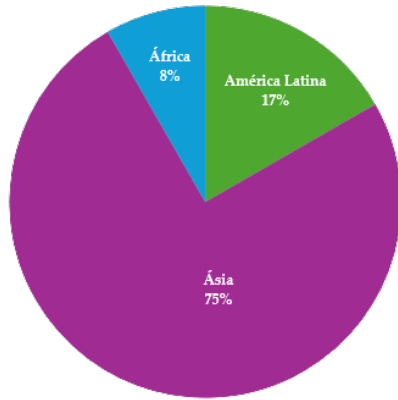


Fig. 2. Distribuição das revisões sobre FVF por continente.

Diversos estudos analisam os mecanismos de resfriamento em sistemas FVF sob clima tropical. A necessidade de estudos sobre o comportamento térmico em diferentes condições ambientais tropicais é destacada em [62]. Além disso, tecnologias de resfriamento para módulos FV são abordadas em [29], identificando lacunas na aplicação dessas tecnologias em sistemas FVF sob clima tropical. Complementariamente, outros estudos também apontam a necessidade de sistemas de resfriamento para otimizar o desempenho [22], [23], [67], incluindo métodos como termossifão [68], pontes de calor [69], ou resfriamento passivo [59]. No entanto, há uma carência de pesquisas que comparem a eficácia de diferentes mecanismos de resfriamento em condições tropicais, onde alta umidade e irradiação intensa prevalecem.

A modelagem térmica também representa um desafio para sistemas FVF em clima tropical. A relação entre plantas FVF e o desempenho térmico é investigada em [60], apontando a falta de modelos preditivos que incorporem adequadamente variáveis específicas do clima tropical, como alta umidade,

intensa irradiação e regime de ventos. A ausência de modelos preditivos para climas tropicais volta a ser destacada em [41], evidenciando a necessidade de normas de design e dados sobre eficiência térmica.

Considerando análises comparativas entre sistemas FVF e convencionais em clima tropical, esses sistemas, na Ásia e Europa, são comparados em [70], identificando lacunas na compreensão da eficiência. Similarmente, em [24] são exploradas as perspectivas da FVF na Ásia Central e do Sul, destacando a necessidade de mais estudos comparativos em condições climáticas tropicais. As revisões [38] sobre FVF *offshore* na China e [39] sobre FV subaquáticos em Singapura apontam para lacunas na compreensão da eficiência térmica em ambientes aquáticos tropicais.

Outra lacuna identificada em [16], [24], [31], [32], [70] é o desempenho a longo prazo de sistemas FVF em clima tropical. O potencial de sistemas híbridos FVF-térmicos é investigado em [71]–[73], apontando a necessidade de mais pesquisas sobre o aproveitamento do calor residual em ambiente tropical. Estudos específicos em regiões tropicais como Brasil [24], Índia [26], [66] e Singapura [25] convergem para a necessidade de pesquisas sobre métodos de resfriamento para otimização do desempenho térmico nessas áreas.

Assim, as revisões analisadas convergem para quatro desafios que demandam atenção da comunidade científica: (1) estudos sobre o desempenho a longo prazo dos FVF sob clima tropical e semiárido; (2) mecanismos complementares de resfriamento; (3) comparação de desempenho entre sistemas FVF e FV convencionais; e (4) modelagem térmica. Na Tabela I são sintetizadas as lacunas identificadas e suas respectivas referências, evidenciando a necessidade de pesquisas direcionadas às particularidades climáticas das regiões tropicais e semiáridas.

IV. ANÁLISE METODOLÓGICA E DO DESEMPENHO DOS SISTEMAS FVF SOB CLIMA TROPICAL

Na Tabela II são apresentados os principais artigos sobre sistemas FVF em clima tropical e semiárido, destacando comportamento térmico, desempenho, método de arrefecimento e ganho de eficiência da planta FVF em relação à FV terrestre / em telhado nas mesmas condições. A tabela possibilita a comparação entre as variações de temperatura reportadas, como a redução de 1,43°C a 2,72°C em [74], ou a redução de

TABELA I
LACUNAS IDENTIFICADAS NAS REVISÕES SOBRE FVF SOB CLIMA TROPICAL E SEMIÁRIDO

Categoria	Lacunas identificadas	Referências
Mecanismos de resfriamento	Sistemas de resfriamento otimizados para clima tropical	[16], [22]
	Métodos específicos de resfriamento	[26], [58]
	Resfriamento passivo e métodos alternativos	[59]
Modelagem térmica	Modelos preditivos específicos	[60], [61]
	Normas de design para eficiência térmica	[26]
Comparação de desempenho	Eficiência em diferentes condições climáticas tropicais	[24]
	Eficiência térmica em ambientes aquáticos tropicais	[21]
Estudos de longo prazo	Degradação térmica ao longo do tempo	[24], [62], [63]
	Desempenho a longo prazo	[30], [37], [62]–[64]
	Aproveitamento do calor dissipado	[65], [66]

TABELA II
ARTIGOS SOBRE FVF EM CLIMA TROPICAL E SEMIÁRIDO

Região	Método de resfriamento	Comportamento térmico	Desempenho quantificado	Ganho eficiência/produktividade vs. convencional
Sul da Ásia [77]	Passivo	Redução de 1,43°C a 2,72°C vs. módulo convencional; maior redução em níveis altos de irradiação	Desempenho 3,19% maior	Ganho de eficiência de 3,19% devido ao efeito de resfriamento passivo
Índia [74]	Passivo (água salina)	Não especificado	Inferior ao resfriamento passivo sobre água doce, não especificado	Perda de 4,075% anual na produtividade
Singapura [25]	Não especificado	Aumento de 0,3°C na temperatura da água sob os módulos; maior estabilidade térmica da coluna d'água	Não especificado	Não especificado
Brasil [69]	Pontes térmicas	Redução de 3,2°C na temperatura do módulo	Aumento de 26,1% na produtividade	26,1% de aumento na produtividade
Singapura [22]	Passivo	Temperatura do ar e água mais altas sob os painéis; aumento de 0,5° na temperatura superficial da água	Redução de eficiência de 0,5%/°C	Não especificado
Brasil [78]	Não especificado	Não especificado	Não especificado	Fator de capacidade em 21,1%
Brasil [79]	Não especificado	Não especificado	Não especificado	Otimização do fator de capacidade de 29% para 34-47%
Singapura [61]	Passivo	Temperatura dos módulos FVF 5-10°C mais baixa nos trópicos	Redução de 0,3-0,5%/1°C	Perda de desempenho para oito strings FVF monitoradas: Método OLS: -0,7%/ano, Método STL: -0,5%/ano, Método YoY: -0,5%/ano.
Singapura [65]	Passivo	Temperatura 14,5°C mais baixa que sistemas convencionais	Redução de potência de 0,4%/1°C	Ganho estimado na produtividade anual de até 6%
Brasil [11]	Não especificado	Não especificado	Não especificado	Apenas cenários de geração anual de eletricidade estimada
Brasil [63]	Passivo	Redução no superaquecimento devido à proximidade com água	Diminuição da geração de 0,4-0,65%/°C; aumento de 5-22% na geração devido ao resfriamento	5-22% em comparação aos FV terrestres
Singapura [80]	Passivo/ativo	Efeito de resfriamento evaporativo significativo; 5-10°C mais baixa	Melhoria de até 10% na produção devido ao efeito de resfriamento	Até 10% maior
Tailândia [81]	Não especificado	Melhor coeficiente de temperatura para CdTe comparado ao Si cristalino	Não especificado	CdTe com vantagens de até 1,6kW sobre o Si policristalino
Brasil [58]	Passivo	Aumento da eficiência com redução da temperatura; não especificado numericamente	Aumento médio de 12,5% da eficiência devido ao resfriamento	12,5% em comparação aos FV terrestres
Índia [82]	Não especificado	Taxas de degradação influenciadas por fatores térmicos: - mc-Si: 1,45-3,41%/ano; a-Si: 1%/ano	Não especificado	Fator de produtividade: 24,93; eficiência de conversão do ciclo de vida: 0,15

14,5°C na temperatura do módulo FV em [65]. Além disso, a tabela evidencia a correlação entre o comportamento térmico e os ganhos de eficiência, que variam de 3,19% a até 26,1% em diferentes condições operacionais, demonstrando o impacto direto da temperatura no desempenho dos sistemas FVF nas regiões em foco.

Uma análise mais detalhada destes estudos é apresentada em quatro vertentes para facilitar a compreensão dos resultados. A Subseção IV-A analisa os diferentes métodos de arrefecimento empregados nos sistemas FVF, incluindo suas características, aplicações e limitações em condições tropicais. Na Subseção IV-B são analisados os resultados de desempenho térmico dos sistemas FVF sob clima tropical, com foco nos fatores que influenciam a temperatura de operação dos módulos e os impactos na eficiência [75], [76]. Por fim, a Subseção IV-C apresenta uma análise dos modelos térmicos utilizados e suas variáveis, destacando as diferentes abordagens de modelagem identificadas nos estudos. Esta organização permite uma avaliação sistemática e abrangente dos métodos de resfriamento, resultados de desempenho, abordagens de

modelagem e viabilidade econômica dos sistemas FVF em clima tropical.

A. Métodos de Arrefecimento

A análise dos métodos de arrefecimento em sistemas FVF sob clima tropical revela diferenças significativas em eficiência e aplicabilidade. O resfriamento passivo natural é o método predominante, proporcionando redução de temperatura de 5-10°C [80] e ganhos de eficiência de 3-6% em clima tropical [65]. Os chamados sistemas com design “aberto” demonstram desempenho térmico superior aos sistemas “fechados”, com redução na geração de 0,4-0,65%/°C e aumento na geração devido ao resfriamento de 5-22% [63]. Em clima tropical, a redução de temperatura pode alcançar 14,5°C em comparação com sistemas convencionais [65]. Sistemas bifaciais flutuantes também tem sido explorados, embora os ganhos específicos não estejam claros na literatura atual. Quanto aos desafios de manutenção, sistemas em água salina apresentam maior degradação e perda de geração (4,1%/ano) em comparação com sistemas FVF em água doce [74]. No geral, em climas

tropicais, diferentes estudos reportam reduções de temperatura variando de 1,43°C a 2,72°C [77] até 3,2°C [69], com ganhos de eficiência correspondentes de 3,19% [77] a 26,1% [69], evidenciando a importância de designs específicos para diferentes condições climáticas.

Diversas estratégias de resfriamento têm sido propostas para maximizar o desempenho térmico dos sistemas FVF em clima tropical. O resfriamento por termossifão [83], utiliza um trocador de calor passivo que se vale da convecção natural, apresentando resultados promissores na redução da temperatura dos módulos e no aumento da eficiência elétrica em até 7,86% em relação a sistemas FV em solo e 3,34% frente a FVF convencionais [68]. Outras estratégias, como circulação forçada de ar, uso de nanofluidos e materiais de mudança de fase, vêm sendo exploradas para aprimorar o desempenho dos módulos FV em diferentes condições climáticas [84]. Entretanto, ainda existem desafios importantes, como a seleção adequada do fluido de resfriamento, a prevenção de incrustações e o equilíbrio entre os custos de implementação e os ganhos de eficiência [85]. Portanto, embora os avanços sejam promissores, a adoção em larga escala requer soluções para essas limitações.

Além das estratégias de resfriamento, outras escolhas durante a instalação de módulos FVF podem ampliar o desempenho, como um ângulo ótimo de inclinação, a profundidade da lagoa e a presença de uma cobertura de vidro [86]. Quando possível, a otimização da elevação dos painéis FV em relação ao nível do reservatório pode elevar a eficiência elétrica em até 17,84% em comparação com projetos não resfriados [9]. O aproveitamento do calor dos módulos também pode ser benéfico, com sistemas híbridos FV-térmicos em clima tropical podendo alcançar eficiência de até 41,83% [87].

B. Análise do Desempenho Térmico e Impacto na Eficiência

Estudos com sistemas FVF em regiões de clima tropical demonstram que seu desempenho pode ser influenciado por fatores ambientais e pelas características estruturais da instalação. Entre os principais benefícios desses sistemas, destaca-se o aumento da eficiência devido ao resfriamento natural proporcionado pela água, resultando em ganhos de até 3% na Holanda e 6% em Singapura [60], [65]. Outra vantagem é a redução da evaporação em reservatórios, como apontado em estudos realizados no Brasil [16], [59]. Esses sistemas também oferecem viabilidade financeira, com um retorno estimado em cerca de oito anos [63], contribuindo para a expansão da geração de energia e para a redução do uso de terra [80]. Por outro lado, plantas FVF podem impactar os ecossistemas aquáticos, reduzindo a qualidade da água [25].

A temperatura dos módulos é influenciada pela velocidade do vento, temperatura ambiente, umidade relativa do ar, poeira acumulada e irradiação solar [88], [89]. O resfriamento natural é fundamental para mitigar o efeito negativo do aumento da temperatura: um acréscimo de 1°C pode reduzir em torno de 0,5% a eficiência de conversão [90] e 0,12 V a tensão de circuito aberto [91]. Em [65], [80], sistemas FVF em Singapura apresentaram um desempenho térmico superior em relação aos sistemas terrestres, com módulos operando a temperaturas 5-

10°C mais baixas e taxas de desempenho até 10% superiores aos sistemas em telhados. Sistemas FVF apresentaram temperaturas frontais 2-4% e traseiras 5-11% menores do que plantas FV em solo, aumentando a geração entre 20% e 28% [92]. Módulos FVF parcialmente submersos registraram uma redução de até 11,10% da temperatura, resultando em um ganho de geração de 18,20% [93]. Estudos experimentais mostram que o ganho de geração pode atingir até 15,5% em comparação com os FV convencionais [94], e a integração com tecnologias como a Lagoa Solar FVF melhora ainda mais a eficiência geral do sistema [71].

Apesar das pesquisas que apresentam ganhos no desempenho térmico, outros estudos apontam que fatores como a velocidade do vento e a temperatura do ar exercem influência mais significativa sobre o desempenho térmico dos módulos do que a própria presença de água sob os painéis [95]. A redução da temperatura das células atribuída à água foi estimada em menos de 1°C em [96], apontando que o resfriamento efetivo pode depender mais das condições ambientais locais do que do corpo d'água em si. Além disso, simulações demonstraram que há variações horárias e diárias significativas nos parâmetros elétricos em função das condições ambientais [67], [97], podendo ocorrer elevação nas temperaturas do ar e da água devido à redução da radiação de ondas curtas e ao aumento da radiação de ondas longas sob os painéis [22]. Um estudo no Camboja demonstrou que, durante o dia, uma instalação FVF apresentou temperaturas significativamente mais elevadas do que outra instalação em telhado, devido à menor exposição ao vento e altura reduzida dos módulos sobre a água [98]. Assim, a configuração do sistema e a ventilação aparentam ser determinantes para o desempenho térmico.

A Fig. 3 apresenta as variáveis que mais influenciam o comportamento térmico dos sistemas FVF em clima tropical. Observa-se que a temperatura ambiente, radiação solar e velocidade do vento exercem alto impacto, apresentando correlações positivas para as duas primeiras variáveis e negativa para a última [99]. Fatores como umidade relativa do ar e presença de água demonstram impacto moderado [100], enquanto a influência da sujidade [101], [102] e estrutura do sistema [99] ainda requerem estudos adicionais para determinação precisa de seus efeitos no desempenho térmico.

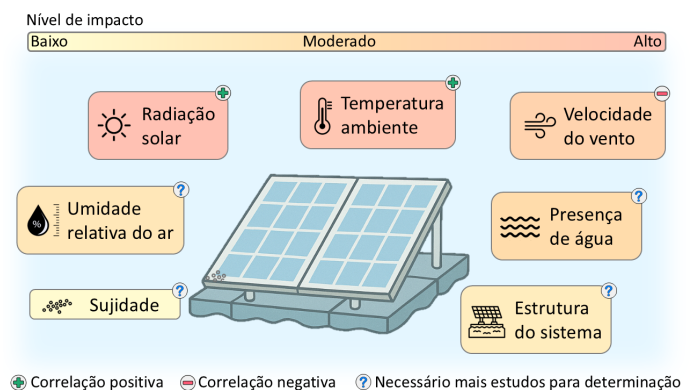


Fig. 3. Gráfico de influência das variáveis que influenciam o comportamento térmico do sistema FVF.

C. Modelagem Térmica

Dos artigos de pesquisa analisados, apenas três apresentam modelos térmicos específicos para sistemas FVF em clima tropical [22], [25], [69], evidenciando uma lacuna significativa na modelagem térmica destes sistemas. Os modelos identificados podem ser categorizados em dois tipos principais: modelos baseado no balanço energético e modelos hidrodinâmico-ecológicos.

Os modelos de balanço energético aparecem em duas variantes. A primeira com foco na interface água-ar [22], que considera fluxos radiativos e não-radiativos na superfície, sendo eficaz para análise do microclima formado sob os painéis. E a segunda, em [69] que, além do balanço energético convencional, incorpora um termo adicional para considerar a transferência de calor por condução através de pontes térmicas, otimizando o resfriamento passivo e demonstrando bom desempenho em condições tropicais com erro de previsão em torno de 5%. Já os modelos hidrodinâmico-ecológicos [25], exemplificados pelo ELCOM-CAEDYM, incorporam equações RANS (*Reynolds-averaged Navier-Stokes*) e são particularmente úteis para avaliar impactos térmicos em larga escala.

A análise das variáveis consideradas nos três modelos térmicos disponíveis revela que irradiância solar e temperatura ambiente são fundamentais em todos os estudos (100%) [22], [25], [69]. A temperatura da água é considerada em dois dos modelos [25], [69] (66,7%), enquanto velocidade do vento e fluxos de calor sensível e latente aparecem em [22], [25] (66,7%). Fatores como número de Richardson são específicos do modelo hidrodinâmico-ecológico [25].

Em síntese, modelos térmicos específicos para FVF em clima tropical, aparecem em apenas 9,7% dos artigos analisados. Esse número reforça a necessidade de desenvolvimento e/ou adaptação de modelos térmicos clássicos para sistemas FVF. Além da necessidade de validação experimental desses modelos considerando as condições ambientais específicas das regiões tropicais, que ainda não são adequadamente contempladas pelos modelos existentes.

V. DISCUSSÃO

As lacunas identificadas (mecanismos de resfriamento, modelagem térmica, comparação de desempenho e estudos de longo prazo) apontam para a necessidade de estudos mais específicos para as condições tropicais. Os estudos de longo prazo representam a maior lacuna (32%), seguidos por mecanismos de resfriamento (27%), modelagem térmica (23%) e comparação de desempenho (18%). Esta distribuição reflete a preocupação com a durabilidade e degradação dos sistemas FVF em condições tropicais, onde fatores como alta umidade, intensa irradiação e temperaturas elevadas podem diminuir a vida útil dos módulos. A concentração geográfica das pesquisas, com 75% na Ásia, 16,7% na América Latina e apenas 8,3% na África, sugere uma oportunidade para expansão de estudos em regiões tropicais na América Latina e África.

Dos artigos analisados, apenas 33,3% apresentam dados econômicos [63], [74], [77], [79], [82], com somente dois

artigos [74], [77] trazendo análises econômicas completas. Os sistemas FVF apresentam custos de capital inicial mais elevados, com componentes específicos custando US\$0,14/W, e Custo Nivelado de Energia (LCOE - *Levelized Cost of Energy*) variando entre US\$0,036-0,043/kWh para água doce e US\$0,038-0,045/kWh para água salina [74]. O período de payback varia de 4,52 a 8 anos [63], [77], e os custos operacionais são estimados em US\$0,072/W [74]. Embora alguns estudos [63], [79] reportem ganhos de eficiência de 5-22%, faltam análises de custo-benefício detalhadas para condições tropicais, com os demais artigos [22], [25], [58], [65], [69], [78], [80], [81] não apresentando análises econômicas.

A análise apresentada na Seção IV revelou tendências importantes nas abordagens utilizadas para estudar sistemas FVF em clima tropical. Os métodos de resfriamento passivo predominam na literatura, com ganhos de eficiência variando de 3% a 26,1%, como evidenciado na Tabela II. Destacam-se os métodos de resfriamento passivo com pontes de calor, que apresentaram o maior ganho de produtividade (26,1%). Além disso, sistemas com design “aberto” apresentaram vantagem no aumento do coeficiente de perda de calor (até 22 W/m²K). A análise dos modelos térmicos revelou uma lacuna significativa na literatura, com apenas 20% dos artigos apresentando modelagem térmica específica para condições de FVF. Os modelos existentes variam desde abordagens simplificadas de balanço energético até modelos hidrodinâmico-ecológicos complexos, como o ELCOM-CAEDYM [25]. Cada abordagem apresenta características distintas: os modelos simplificados focam principalmente nas trocas de calor por convecção e radiação, os modelos complexos requerem extensa parametrização e validação experimental para condições tropicais, e os modelos híbridos, embora promissores por sua capacidade de considerar múltiplos fenômenos simultaneamente, ainda necessitam de mais validação experimental em clima tropical.

As principais limitações dos modelos atuais para aplicação em clima tropical incluem: (1) inadequada consideração da alta umidade relativa e seu impacto nas trocas térmicas; (2) simplificação excessiva dos padrões de vento característicos; e (3) desconsideração da intensa radiação difusa típica dessas regiões. Esta diversidade de abordagens, embora promissora, evidencia a necessidade de validação mais rigorosa para padronização dos modelos em condições tropicais, especialmente considerando altos níveis de temperatura ambiente, umidade e radiação solar características destas regiões. Futuros desenvolvimentos em modelagem térmica para FVF em clima tropical devem priorizar a integração de parâmetros ambientais específicos e validação experimental de longo prazo.

Além dos métodos convencionais de resfriamento, diversas estratégias complementares vêm sendo exploradas: resfriamento por termossifão [68], otimização da altura do reservatório [9], uso de pontes térmicas [69], circulação forçada de ar, nanofluidos e materiais de mudança de fase [84]. Fatores relacionados à instalação também podem ampliar o desempenho: o ângulo de inclinação dos módulos, a profundidade da lagoa e a presença de cobertura de vidro [86] e o aproveitamento do calor residual para sistemas híbridos FV-térmicos. Contudo, a literatura atual apresenta pouquíssimos

estudos dedicados a avaliar a eficácia dessas estratégias em condições tropicais, com análises de custo-benefício limitadas. Assim, pesquisas adicionais são necessárias para comprovar a viabilidade técnica e financeiras dessas abordagens, especialmente considerando os desafios de implementação e manutenção a longo prazo em ambientes tropicais.

Considerando os desafios em ambientes tropicais, é observado em sistemas flutuantes em água salina/salobra [74] uma maior degradação e perda anual de produção (4,1%), comparados aos sistemas em água doce. Além disso, impactos nos ecossistemas aquáticos [25] e elevação nas temperaturas do ar e da água [22] são mencionados. Apesar do crescente interesse relacionado aos impactos de FVF no ambiente aquático, poucos estudos têm sido desenvolvidos em clima tropical, com temperatura da água, fauna e flora específicas.

Enquanto a maioria das pesquisas demonstra vantagens dos sistemas FVF, como aumento da eficiência de conversão [4], [5], [11], [65], [103], redução da evaporação da água [58], [104] e viabilidade financeira [58], outras pesquisas sugerem que a velocidade do vento e a temperatura do ar exercem influência mais significativa que a própria presença da água [95], [96], [98]. Estes estudos mostram pouca redução da temperatura das células devido à água, estimada em menos de 1°C, sob mesmas condições ambientais. Esta característica é particularmente relevante para regiões tropicais, onde o gradiente entre temperatura ambiente e da água é menos acentuado que em regiões temperadas, podendo comprometer o efeito de resfriamento esperado. Assim, uma pergunta permanece para futuras pesquisas: os ganhos observados na performance FVF são relacionados à proximidade com a água ou a ventilação é um fator determinante para o desempenho?

VI. CONCLUSÃO

A presente revisão bibliométrica sobre o comportamento térmico de módulos FVF em clima tropical revela um panorama de desafios e oportunidades. A análise evidencia que o desempenho térmico dos sistemas FVF em regiões tropicais é influenciado por múltiplas variáveis ambientais, com destaque para a irradiação solar, temperatura ambiente, regimes de vento e umidade. Quatro lacunas na literatura foram identificadas: mecanismos de resfriamento, modelagem térmica, comparação de desempenho e estudos de longo prazo.

Os resultados também destacam a eficácia de diferentes métodos de resfriamento, com o resfriamento passivo com pontes térmicas apresentando o maior ganho de produtividade. Sistemas com design “aberto” demonstraram desempenho térmico superior aos sistemas “fechados”, com aumento no coeficiente de perda de calor de até 22 W/m²K. Por outro lado, são identificados desafios específicos como a maior degradação em ambientes salinos e salobros. A literatura atual carece de modelos preditivos específicos para clima tropical com apenas três abordagens identificadas - balanço energético superficial, hidrodinâmico-ecológico e transferência de calor por condução - que ainda necessitam de validação experimental extensiva que incorporem adequadamente variáveis como alta umidade, intensa radiação solar e regimes de vento particulares. Além disso, há uma necessidade de estudos

sistemáticos sobre a eficácia de estratégias complementares de resfriamento e análises de custo-benefício em condições tropicais específicas, considerando que apenas 41,2% dos artigos apresentam dados econômicos e somente 11,8% trazem análises econômicas completas.

As seguintes linhas são sugeridas para avançar no conhecimento sobre sistemas FVF em clima tropical: (1) desenvolvimento de estudos longitudinais sobre perdas térmicas; (2) investigações comparativas sobre a eficácia de diferentes mecanismos de resfriamento; (3) criação de modelos preditivos específicos para condições tropicais; (4) análises sobre o papel da água e da ventilação no desempenho térmico destes sistemas; (5) estudos econômicos que contemplem custos de manutenção em longo prazo e tratamentos anti-corrosão específicos para ambiente tropical e (6) desenvolvimento e validação de novos modelos térmicos, considerando que apenas três abordagens foram identificadas na literatura. Estas investigações são essenciais para otimizar o desempenho dos sistemas FVF em regiões tropicais, promovendo a expansão sustentável desta tecnologia promissora diante da crescente demanda energética global.

AGRADECIMENTOS

À FUNCAP, vinculada à Secretaria de Ciência, Tecnologia e Educação Superior do Ceará (SECITECE), pelas bolsas de mestrado ao primeiro autor e doutorado à segunda autora, CNPq pela bolsa de pesquisador ao terceiro autor. Ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e Elétrica da UFC.

REFERENCES

- [1] J. L. Holecek, H. M. Geli, M. N. Sawalhah, and R. Valdez, “A global assessment: can renewable energy replace fossil fuels by 2050?” *Sustainability*, vol. 14, no. 8, p. 4792, 2022, doi:10.3390/su14084792.
- [2] R. Cazzaniga and M. Rosa-Clot, “The booming of floating pv,” *Sol. Energy*, vol. 219, pp. 3–10, 2021, doi:10.1016/j.solener.2020.09.057.
- [3] International Renewable Energy Agency (IRENA), “Future of wind: Deployment, investment, technology, grid integration and socio-economic aspects,” International Renewable Energy Agency (IRENA), Abu Dhabi, Tech. Rep., 2019, accessed: Jan. 26, 2025. [Online]. Available: <https://www.irena.org/publications/2019/Oct/Future-of-wind>
- [4] A. Sahu, N. Yadav, and K. Sudhakar, “Floating photovoltaic power plant: A review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 66, pp. 815–824, 2016, doi:10.1016/j.rser.2016.08.051.
- [5] K. Trapani and M. R. Santafé, “A review of floating photovoltaic installations: 2007–2013,” *Prog. Photovolt. Res. Appl.*, vol. 23, no. 4, pp. 524–532, 2015, 10.1002/pip.2466.
- [6] J. P. Reges, P. C. Carvalho, J. C. de Araújo, and T. C. Carneiro, “Sizing methodology of floating photovoltaic plants in dams of semi-arid areas,” *J. Sol. Energy Eng.*, vol. 144, no. 4, p. 041003, 2022, doi:10.1115/1.4052959.
- [7] S. Oliveira-Pinto and J. Stokkermans, “Assessment of the potential of different floating solar technologies – overview and analysis of different case studies,” *Energy Convers. Manage.*, vol. 211, p. 112747, 2020, doi:10.1016/j.enconman.2020.112747.
- [8] E. Cuce, P. M. Cuce, S. Saboor, A. Ghosh, and Y. Sheikhnejad, “Floating pvs in terms of power generation, environmental aspects, market potential, and challenges,” *Sustainability*, vol. 14, no. 5, p. 2626, 2022, doi:10.3390/su14052626.
- [9] B. Sutanto, H. Iacovides, A. Nasser, A. Cioncolini, I. Afgan, Y. S. Indartono, T. Prasetyo, and A. T. Wijayanta, “Design and analysis of passively cooled floating photovoltaic systems,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 236, p. 121801, 2024, doi:10.1016/j.applthermaleng.2023.121801.
- [10] L. Essak and A. Ghosh, “Floating photovoltaics: A review,” *Clean Technol.*, vol. 4, no. 3, pp. 752–769, 2022, doi:10.3390/cleantechnol4030046.

- [11] M. P. C. Lopes, S. de Andrade Neto, D. A. C. Branco, M. A. V. de Freitas, and N. da Silva Fidelis, "Water-energy nexus: Floating photovoltaic systems promoting water security and energy generation in the semi-arid region of Brazil," *J. Cleaner Prod.*, vol. 273, p. 122010, 2020, doi:10.1016/j.jclepro.2020.122010.
- [12] F. Bontempo Scavo, G. M. Tina, A. Gagliano, and S. Nižetić, "An assessment study of evaporation rate models on a water basin with floating photovoltaic plants," *Int. J. Energy Res.*, vol. 45, no. 1, pp. 167–188, 2021, doi:10.1002/er.5170.
- [13] Q. Abdelal, "Floating pv: an assessment of water quality and evaporation reduction in semi-arid regions," *Int. J. Low-Carbon Technol.*, vol. 16, no. 3, pp. 732–739, 2021, doi:10.1093/IJLCT/CTAB001.
- [14] L. W. Farrar, A. S. Bahaj, P. James, A. Anwar, and N. Amdar, "Floating solar pv to reduce water evaporation in water stressed regions and powering water pumping: Case study Jordan," *Energy Convers. Manage.*, vol. 260, p. 115598, 2022, doi:10.1016/j.enconman.2022.115598.
- [15] A. E. Cagle, A. Armstrong, G. Exley, S. M. Grodsky, J. Macknick, J. Sherwin, and R. R. Hernandez, "The land sparing, water surface use efficiency, and water surface transformation of floating photovoltaic solar energy installations," *Sustainability*, vol. 12, no. 19, p. 8154, 2020, doi:10.3390/SU12198154.
- [16] F. R. d. Santos, G. K. Wiecheteck, J. S. d. Virgens Filho, G. A. Caranza, T. L. Chambers, and A. Fekih, "Effects of a floating photovoltaic system on the water evaporation rate in the passauína reservoir, Brazil," *Energies*, vol. 15, no. 17, p. 6274, 2022, doi:10.3390/en15176274.
- [17] M. Kumar, H. M. Niyaz, and R. Gupta, "Challenges and opportunities towards the development of floating photovoltaic systems," *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, p. 111408, 2021, doi:10.1016/j.solmat.2021.111408.
- [18] T. AlSkaif, S. Dev, L. Visser, M. Hossari, and W. van Sark, "A systematic analysis of meteorological variables for pv output power estimation," *Renew. Energy*, vol. 153, pp. 12–22, 2020, doi:10.1016/j.renene.2020.01.150.
- [19] A. Garrod, S. N. Hussain, A. Ghosh, S. Nahata, C. Wynne, and S. Paver, "An assessment of floating photovoltaic systems and energy storage methods: A comprehensive review," *Results Eng.*, p. 101940, 2024, doi:10.1016/j.rineng.2024.101940.
- [20] C. Veliathur Chinnasamy Srinivasan, P. K. Soori, and F. A. Ghaith, "Techno-economic feasibility of the use of floating solar pv systems in oil platforms," *Sustainability*, vol. 16, no. 3, p. 1039, 2024, doi:10.3390/su16031039.
- [21] A. Ghosh, "A comprehensive review of water based pv: Flotovoltaics, under water, offshore & canal top," *Ocean Eng.*, vol. 281, p. 115044, 2023, doi:10.1016/j.oceaneng.2023.115044.
- [22] P. Yang, L. H. C. Chua, K. N. Irvine, and J. Imberger, "Radiation and energy budget dynamics associated with a floating photovoltaic system," *Water Res.*, vol. 206, p. 117745, 2021, doi:10.1016/j.watres.2021.117745.
- [23] A. Ahmed, M. Elsakka, N. Elminshawy, A. Mohamed, and S. Sundaram, "Recent advances in floating photovoltaic systems," *Chem. Rec.*, p. e202300229, 2023, doi:10.1002/tcr.202300229.
- [24] H. M. Pouran, M. P. C. Lopes, T. Nogueira, D. A. C. Branco, and Y. Sheng, "Environmental and technical impacts of floating photovoltaic plants as an emerging clean energy technology," *iScience*, vol. 25, no. 11, 2022, doi:10.1016/j.isci.2022.105253.
- [25] P. Yang, L. H. C. Chua, K. N. Irvine, M. T. Nguyen, and E.-W. Low, "Impacts of a floating photovoltaic system on temperature and water quality in a shallow tropical reservoir," *Limnol.*, vol. 23, no. 3, pp. 441–454, 2022, doi:10.1007/s10201-022-00698-y.
- [26] J. Charles Rajesh Kumar and M. Majid, "Floating solar photovoltaic plants in India - a rapid transition to a green energy market and sustainable future," *Energy Environ.*, vol. 34, no. 2, pp. 304–358, 2023, doi:10.1177/0958305X211057185.
- [27] P. Ranjbaran, H. Yousefi, G. B. Gharehpetian, and F. R. Asaraei, "A review on floating photovoltaic (fpv) power generation units," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 110, pp. 332–347, 2019, doi:10.1016/j.rser.2019.05.015.
- [28] D. Kamani and M. Ardehali, "Long-term forecast of electrical energy consumption with considerations for solar and wind energy sources," *Energy*, vol. 268, p. 126617, 2023, doi:10.1016/j.energy.2023.126617.
- [29] R. Cazzaniga, M. Cicu, M. Rosa-Clot, P. Rosa-Clot, G. M. Tina, and C. Ventura, "Floating photovoltaic plants: Performance analysis and design solutions," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 81, pp. 1730–1741, 2018, doi:10.1016/j.rser.2017.05.269.
- [30] M. Abid, Z. Abid, J. Sagin, R. Murtaza, D. Sarbassov, and M. Shabbir, "Prospects of floating photovoltaic technology and its implementation in central and south Asian countries," *Int. J. Environ. Sci. Technol.*, vol. 16, pp. 1755–1762, 2019, doi:10.1007/s13762-018-2080-5.
- [31] M. Zhang and S. Schreier, "Review of wave interaction with continuous flexible floating structures," *Ocean Eng.*, vol. 264, p. 112404, 2022, doi:10.1016/j.oceaneng.2022.112404.
- [32] N. M. Kumar, S. Islam, A. K. Podder, A. Selim, M. Bajaj, and S. Kamel, "Lifecycle-based feasibility indicators for floating solar photovoltaic plants along with implementable energy enhancement strategies and framework-driven assessment approaches leading to advancements in the simulation tool," *Front. Energy Res.*, vol. 11, p. 1075384, 2023, doi:10.3389/fenrg.2023.1075384.
- [33] L. R. do Nascimento, M. Braga, R. A. Campos, H. F. Naspolini, and R. Rütger, "Performance assessment of solar photovoltaic technologies under different climatic conditions in Brazil," *Renew. Energy*, pp. 1070–1082, 2020, doi:10.1016/j.renene.2019.06.160.
- [34] R. Claus and M. López, "Key issues in the design of floating photovoltaic structures for the marine environment," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 164, p. 112502, 2022, doi:10.1016/j.rser.2022.112502.
- [35] S. Oliveira-Pinto and J. Stokkermans, "Marine floating solar plants: An overview of potential, challenges and feasibility," in *Proc. Inst. Civ. Eng. – Maritime Eng.*, vol. 173, no. 4, 2020, pp. 120–135, doi:10.1680/jmaen.2020.10.
- [36] R. Zahedi, P. Ranjbaran, G. B. Gharehpetian, F. Mohammadi, and R. Ahmadihangar, "Cleaning of floating photovoltaic systems: A critical review on approaches from technical and economic perspectives," *Energies*, vol. 14, no. 7, p. 2018, 2021, doi:10.3390/en14072018.
- [37] M. Li, H. Luo, S. Zhou, G. M. S. Kumar, X. Guo, T. C. Law, and S. Cao, "State-of-the-art review of the flexibility and feasibility of emerging offshore and coastal ocean energy technologies in east and southeast Asia," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 162, p. 112404, 2022, doi:10.1016/j.rser.2022.112404.
- [38] G. Exley, R. R. Hernandez, T. Page, M. Chipps, S. Gambro, M. Hersey, R. Lake, K.-S. Zoannou, and A. Armstrong, "Scientific and stakeholder evidence-based assessment: Ecosystem response to floating solar photovoltaics and implications for sustainability," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 152, p. 111639, 2021, doi:10.1016/j.rser.2021.111639.
- [39] J. Wang and P. D. Lund, "Review of recent offshore photovoltaics development," *Energies*, vol. 15, no. 20, p. 7462, 2022, doi:10.3390/en15207462.
- [40] S. Tabassum, T. Rahman, A. U. Islam, S. Rahman, D. R. Dipta, S. Roy, N. Mohammad, N. Nawar, and E. Hossain, "Solar energy in the United States: Development, challenges and future prospects," *Energies*, vol. 14, no. 23, p. 8142, 2021, doi:10.3390/en14238142.
- [41] M. Vivar, H. Sharon, and M. Fuentes, "Photovoltaic system adoption in water related technologies: A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 189, p. 114004, 2024, doi:10.1016/j.rser.2023.114004.
- [42] J. Hu, K. Teng, C. Li, X. Li, J. Wang, and P. D. Lund, "Review of recent water photovoltaics development," *Oxf. Open Energy*, p. oia005, 2023, doi:10.1093/ooenergy/oia005.
- [43] M. R. Khan, M. T. Patel, R. Asadpour, H. Imran, N. Z. Butt, and M. A. Alam, "A review of next generation bifacial solar farms: Predictive modeling of energy yield, economics, and reliability," *J. Phys. D: Appl. Phys.*, vol. 54, no. 32, p. 323001, 2021, doi:10.1088/1361-6463/abfce5.
- [44] M. Abou Akrouh, K. Chahine, J. Faraj, F. Hachem, C. Castelain, and M. Khaled, "Advancements in cooling techniques for enhanced efficiency of solar photovoltaic panels: A detailed comprehensive review and innovative classification," *Energy Built Environ.*, 2023, doi:10.1016/j.enbenv.2023.11.002.
- [45] R. Nobre, S. Boulêtreau, F. Colas, F. Azémar, L. Tudesque, N. Parthuisot, P. Favriou, and J. Cucherousset, "Potential ecological impacts of floating photovoltaics on lake biodiversity and ecosystem functioning," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 188, p. 113852, 2023, doi:10.1016/j.rser.2023.113852.
- [46] S. Benjamins, B. Williamson, S.-L. Billing, Z. Yuan, M. Collu, C. Fox, L. Hobbs, E. A. Masden, E. J. Cottier-Cook, and B. Wilson, "Potential environmental impacts of floating solar photovoltaic systems," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 199, p. 114463, 2024, doi:10.1016/j.rser.2024.114463.
- [47] A. Majumder, A. Kumar, R. Innamorati, C. C. Mastino, G. Cappellini, R. Baccoli, and G. Gatto, "Cooling methods for standard and floating pv panels," *Energies*, p. 7939, 2023, doi:10.3390/en16247939.
- [48] M. A. Koonthar, L. Albasha, I. Mahariq, B. B. Graba, and E. Touti, "Reviewing floating photovoltaic (fpv) technology for solar energy generation," *Energy Strategy Rev.*, p. 101449, 2024, doi:10.1016/j.esr.2024.101449.
- [49] J. F. Rosales-Pérez, A. Villarruel-Jaramillo, J. A. Romero-Ramos, M. Pérez-García, J. M. Cardemil, and R. Escobar, "Hybrid system of photovoltaic and solar thermal technologies for industrial process heat," *Energies*, vol. 16, no. 5, p. 2220, 2023, doi:10.3390/en16052220.

- [50] M. Nicola and M. Berwind, "Improving module temperature prediction models for floating photovoltaic systems: Analytical insights from operational data," *Energies*, vol. 17, no. 17, 2024, doi:10.3390/en17174289.
- [51] C. J. Ramanan, K. H. Lim, J. C. Kurnia, S. Roy, B. J. Bora, and B. J. Medhi, "Towards sustainable power generation: Recent advancements in floating photovoltaic technologies," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 194, p. 114322, 2024, doi:10.1016/j.rser.2024.114322.
- [52] J. de Oliveira Gonzalez, F. R. Martins, and R. S. Costa, "Estudo de performance de sistema fotovoltaico operando na baixada santista: Case study in baixada santista," in *Proc. Congr. Bras. Energia Solar (CBENS)*, 2022, pp. 1–10, doi:10.59627/cbens.2022.1129.
- [53] N. D. de Araujo, I. Zanesco, R. A. L. Fuentes, A. Moehlecke, S. B. Garcia, and G. P. Araújo, "Evolução e análise de sistemas fotovoltaicos no brasil e chile," in *Proc. Congr. Bras. Energia Solar (CBENS)*, 2018, doi:10.59627/cbens.2018.119.
- [54] G. Narvaez, M. Bressan, A. Pantoja, and L. F. Giraldo, "Climate change impact on photovoltaic power potential in south america," *Environ. Res. Commun.*, vol. 5, no. 8, p. 081004, 2023, doi:10.1088/2515-7620/acf02e.
- [55] F. R. Martins and E. B. Pereira, "Enhancing information for solar and wind energy technology deployment in brazil," *Energy Policy*, vol. 39, no. 7, pp. 4378–4390, 2011, doi:10.1016/j.enpol.2011.04.058.
- [56] Elysia Energia Solar, "Custo de manutenção de sistema fotovoltaico: Alto ou baixo?" 2017, accessed: Oct. 15, 2024. [Online]. Available: <http://www.elysia.com.br/blog/manutencao-de-painel-fotovoltaico/>.
- [57] R. Vaillon, O. Dupré, R. B. Cal, and M. Calaf, "Pathways for mitigating thermal losses in solar photovoltaics," *Sci. Rep.*, vol. 8, no. 1, p. 13163, 2018, doi:10.1038/s41598-018-31257-0.
- [58] A. R. Gonçalves, A. T. Assireu, F. R. Martins, M. S. G. Casagrande, E. V. Mattos, R. S. Costa, R. B. Passos, S. V. Pereira, M. P. Pes, F. J. L. Lima *et al.*, "Enhancement of cloudless skies frequency over a large tropical reservoir in brazil," *Remote Sens.*, vol. 12, no. 17, p. 2793, 2020, doi:10.3390/rs12172793.
- [59] M. P. C. Lopes, T. Nogueira, A. J. L. Santos, D. C. Branco, and H. Pouran, "Technical potential of floating photovoltaic systems on artificial water bodies in brazil," *Renew. Energy*, vol. 181, pp. 1023–1033, 2022, doi:10.1016/j.renene.2021.09.104.
- [60] L. Micheli, "The temperature of floating photovoltaics: Case studies, models and recent findings," *Sol. Energy*, vol. 242, pp. 234–245, 2022, doi:10.1016/j.solener.2022.06.039.
- [61] W. Luo, S. N. Isukapalli, L. Vinayagam, S. A. Ting, M. Pravettoni, T. Reindl, and A. Kumar, "Performance loss rates of floating photovoltaic installations in the tropics," *Sol. Energy*, vol. 219, pp. 58–64, 2021, doi:10.1016/j.solener.2020.12.019.
- [62] S. Gorjian, H. Sharon, H. Ebadi, K. Kant, F. B. Scavo, and G. M. Tina, "Recent technical advancements, economics and environmental impacts of floating photovoltaic solar energy conversion systems," *J. Clean. Prod.*, vol. 278, p. 124285, 2021, doi:10.1016/j.jclepro.2020.124285.
- [63] I. S. Rodrigues, G. L. B. Ramalho, and P. H. A. Medeiros, "Potential of floating photovoltaic plant in a tropical reservoir in brazil," *J. Environ. Plann. Manage.*, vol. 63, no. 13, pp. 2334–2356, 2020, doi:10.1080/09640568.2020.1719824.
- [64] T. M. David, T. M. de Souza, and P. M. S. R. Rizol, "Photovoltaic systems: a review with analysis of the energy transition in brazilian culture, 2018–2023," *Energy Inform.*, vol. 7, no. 1, p. 14, 2024, doi:10.1186/s42162-024-00316-4.
- [65] M. Dörenkämper, A. Wahed, A. Kumar, M. de Jong, J. Kroon, and T. Reindl, "The cooling effect of floating pv in two different climate zones: A comparison of field test data from the netherlands and singapore," *Sol. Energy*, vol. 219, pp. 15–23, 2021, doi:10.1016/j.solener.2020.11.029.
- [66] A. S. Makhija and S. S. Bohra, "Performance and degradation analysis for different solar photovoltaic technologies under hot and humid environment: A review," *Prog. Energy*, vol. 5, no. 4, p. 042002, 2023, doi:10.1088/2516-1083/acfc92.
- [67] C. B. Maia, A. S. A. C. Diniz, S. A. Bonfim, and L. L. Kazmerski, "Evaluation of the electrical parameters and performance of floating pv generators," *Renew. Energy Environ. Sustain.*, vol. 9, p. 5, 2024, doi:10.1051/rees/2024003.
- [68] B. Sutanto, Y. S. Indartono, A. T. Wijayanta, and H. Iacovides, "Enhancing the performance of floating photovoltaic system by using thermosiphon cooling method: Numerical and experimental analyses," *Int. J. Therm. Sci.*, vol. 180, p. 107727, 2022, doi:10.1016/j.ijthermalsci.2022.107727.
- [69] B. de O. Busson, L. de O. Santos, P. C. M. de Carvalho, and C. de O. C. Filho, "Experimental assessment and modeling of a floating photovoltaic module with heat bridges," *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 19, no. 12, pp. 2079–2086, 2021, doi:10.1109/TLA.2021.9480150.
- [70] R. Cazzaniga, M. Rosa-Clot, P. Rosa-Clot, and G. M. Tina, "Integration of pv floating with hydroelectric power plants," *Heliyon*, vol. 5, no. 6, p. e01918, 2019, doi:10.1016/j.heliyon.2019.e01918.
- [71] R. S. Aweid, O. K. Ahmed, and S. Algburi, "Performance of floating photovoltaic/thermal system: Experimental assessment," *Int. J. Energy Res.*, vol. 46, no. 15, pp. 24229–24242, 2022, doi:10.1002/er.8729.
- [72] S. U. Batgi and I. Dincer, "Design and analysis of a floating photovoltaic based integrated energy system with ammonia production," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 252, p. 123676, 2024, doi:10.1016/j.applthermaleng.2024.123676.
- [73] E. Solomin, E. Sirotkin, E. Cuce, S. P. Selvanathan, and S. Kumarasamy, "Hybrid floating solar plant designs: a review," *Energies*, vol. 14, no. 10, p. 2751, 2021, doi:10.3390/EN14102751.
- [74] N. K. Singh and P. K. Sadhu, "The investigation of energy and economy for floating solar pv system on saline water," *Microsyst. Technol.*, vol. 30, no. 9, pp. 1079–1086, 2024, doi:10.1007/s00542-023-05509-7.
- [75] L. de Oliveira Santos, P. C. M. de Carvalho, and C. de Oliveira Carvalho Filho, "Photovoltaic cell operating temperature models: a review of correlations and parameters," *IEEE J. Photovolt.*, vol. 12, no. 1, pp. 179–190, 2021, doi:10.1109/JPHOTOV.2021.3113156.
- [76] L. O. Santos, F. A. Souza, C. O. Carvalho Filho, P. C. Carvalho, T. AlSkaf, and R. I. Pereira, "Hybrid modeling for photovoltaic module operating temperature estimation," *IEEE J. Photovolt.*, 2024, doi:10.1109/JPHOTOV.2024.3372328.
- [77] G. R. Pandian, G. B. Balachandran, P. W. David, and S. K., "Performance analysis of floating bifacial stand-alone photovoltaic module in tropical freshwater systems of southern asia: an experimental study," *Sci. Rep.*, vol. 14, no. 1, p. 20352, 2024, doi:10.1038/s41598-024-70015-3.
- [78] É. F. de Campos, E. B. Pereira, P. van Oel, F. R. Martins, A. R. Gonçalves, and R. S. Costa, "Hybrid power generation for increasing water and energy securities during drought: Exploring local and regional effects in a semi-arid basin," *J. Environ. Manage.*, vol. 294, p. 112989, 2021, doi:10.1016/j.jenvman.2021.112989.
- [79] E. M. d. Sacramento, P. C. Carvalho, J. C. de Araújo, D. B. Riffel, R. M. d. C. Corrêa, and J. S. Pinheiro Neto, "Scenarios for use of floating photovoltaic plants in brazilian reservoirs," *IET Renew. Power Gener.*, vol. 9, no. 8, pp. 1019–1024, 2015, doi:10.1049/iet-rpg.2015.0120.
- [80] H. Liu, V. Krishna, J. Lun Leung, T. Reindl, and L. Zhao, "Field experience and performance analysis of floating pv technologies in the tropics," *Prog. Photovolt. Res. Appl.*, vol. 26, no. 12, pp. 957–967, 2018, doi:10.1002/ppp.3039.
- [81] A. H. Munshi, N. Sasidharan, S. Pinkayan, K. L. Barth, W. S. Sampath, and W. Ongsakul, "Thin-film cde photovoltaics—the technology for utility scale sustainable energy generation," *Sol. Energy*, vol. 173, pp. 511–516, 2018, doi:10.1016/j.solener.2018.07.090.
- [82] P. Rajput, M. Malvoni, N. Manoj Kumar, O. Sastry, and A. Jayakumar, "Operational performance and degradation influenced life cycle environmental-economic metrics of mc-si, a-si and hit photovoltaic arrays in hot semi-arid climates," *Sustain.*, vol. 12, no. 3, p. 1075, 2020, doi:10.3390/su12031075.
- [83] B. Sutanto and Y. S. Indartono, "Computational fluid dynamic (cfd) modelling of floating photovoltaic cooling system with loop thermosiphon," in *Proc. AIP Conf.*, vol. 2062, no. 1, 2019, doi:10.1063/1.5086558.
- [84] A. Salari, A. Kazemian, T. Ma, A. Hakkaki-Fard, and J. Peng, "Nanofluid based photovoltaic thermal systems integrated with phase change materials: numerical simulation and thermodynamic analysis," *Energy Convers. Manage.*, vol. 205, p. 112384, 2020, doi:10.1016/j.enconman.2019.112384.
- [85] C. Zhang, C. Shen, S. Wei, Y. Wang, G. Lv, and C. Sun, "A review on recent development of cooling technologies for photovoltaic modules," *J. Therm. Sci.*, vol. 29, pp. 1410–1430, 2020, doi:10.1007/s11630-020-1350-y.
- [86] A. Aslam, N. Ahmed, S. A. Qureshi, M. Assadi, and N. Ahmed, "Advances in solar pv systems: A comprehensive review of pv performance, influencing factors, and mitigation techniques," *Energies*, vol. 15, no. 20, p. 7595, 2022, doi:10.3390/en15207595.
- [87] V. F. Do Nascimento, I. Yahyaoui, R. Fiorotti, A. E. A. Amorim, I. C. Belisário, C. E. S. Abreu, H. R. O. Rocha, and F. Tadeo, "Dimensioning and efficiency evaluation of a hybrid photovoltaic thermal system in a tropical climate region," *Sustain. Energy Grids Netw.*, vol. 32, p. 100954, 2022, doi:10.1016/j.segan.2022.100954.

- [88] D. Atsu and A. Dhaundiyal, "Effect of ambient parameters on the temperature distribution of photovoltaic (pv) modules," *Resources*, p. 107, 2019, doi:10.3390/resources8020107.
- [89] A. Gholami, M. Ameri, M. Zandi, R. G. Ghoachani, S. J. Gerashi, H. A. Kazem, and A. H. A. Al-Waeli, "Impact of harsh weather conditions on solar photovoltaic cell temperature: Experimental analysis and thermal-optical modeling," *Sol. Energy*, pp. 176–194, 2023, doi:10.1016/j.solener.2023.01.039.
- [90] A. A. Alzaabi, N. K. Badawiyeh, H. O. Hantoush, and A. K. Hamid, "Electrical/thermal performance of hybrid pv/t system in sharjah, uae," *Int. J. Smart Grid Clean Energy*, vol. 3, no. 4, pp. 385–389, 2014, doi:10.12720/sgece.3.4.385-389.
- [91] M. Sharaf, M. S. Yousef, and A. S. Huzayyin, "Review of cooling techniques used to enhance the efficiency of photovoltaic power systems," *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 29, no. 18, pp. 26 131–26 159, 2022, doi:10.1007/s11356-022-18719-9.
- [92] H. Nisar, A. K. Janjua, H. Hafeez, N. Shahzad, A. Waqas *et al.*, "Thermal and electrical performance of solar floating pv system compared to on-ground pv system – an experimental investigation," *Sol. Energy*, vol. 241, pp. 231–247, 2022, doi:10.1016/j.solener.2022.05.062.
- [93] N. A. Elminshawy, A. Osama, A. M. Saif, and G. M. Tina, "Thermo-electrical performance assessment of a partially submerged floating photovoltaic system," *Energy*, vol. 246, p. 123444, 2022, doi:10.1016/j.energy.2022.123444.
- [94] Z. A. A. Majid, M. H. Ruslan, K. Sopian, M. Y. Othman, and M. S. M. Azmi, "Study on performance of 80 watt floating photovoltaic panel," *J. Mech. Eng. Sci.*, vol. 7, pp. 1150–1156, 2014, doi:10.15282/jmes.7.2014.14.0112.
- [95] D. Lindholm, T. Kjeldstad, J. Selj, E. S. Marstein, and H. G. Fjær, "Heat loss coefficients computed for floating pv modules," *Prog. Photovolt.: Res. Appl.*, vol. 29, no. 12, pp. 1262–1273, 2021, doi:10.1002/pip.3451.
- [96] D. Lindholm, J. Selj, T. Kjeldstad, H. Fjær, and V. Nysted, "Cfd modelling to derive u-values for floating pv technologies with large water footprint," *Sol. Energy*, vol. 238, pp. 238–247, 2022, doi:10.1016/j.solener.2022.04.028.
- [97] B. B. Freitas, B. R. A. Bezerra, C. A. T. Júnior, C. F. de Oliveira Júnior, D. P. de Assis, E. de Sousa Queiroz Filho, F. T. do Nascimento, F. W. S. de Oliveira, G. F. Alves, J. V. T. Alves *et al.*, "Methodology using idle capacity of hydroelectric substations for sizing floating photovoltaic plants," *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 22, no. 9, pp. 771–777, 2024, doi:10.1109/TLA.2024.10669249.
- [98] I. Peters and A. Nobre, "Deciphering the thermal behavior of floating photovoltaic installations," *Sol. Energy Adv.*, vol. 2, p. 100007, 2022, doi:10.1016/j.seja.2021.100007.
- [99] C. Ramanan, K. H. Lim, J. C. Kurnia, S. Roy, B. J. Bora, and B. J. Medhi, "Design study on the parameters influencing the performance of floating solar pv," *Renew. Energy*, vol. 223, p. 120064, 2024, doi:10.1016/j.renene.2024.120064.
- [100] L. H. Novak and R. A. Borba, "Sistemas fotovoltaicos flutuantes: Aspectos positivos e desafios," in *Proc. Congr. Bras. Energia Solar (CBENS)*. CBENS, 2018, doi:10.59627/cbens.2018.151.
- [101] H. Almkhtar, T. T. Lie, W. A. Al-Shohani, T. Anderson, and Z. Al-Tameemi, "Comprehensive review of dust properties and their influence on photovoltaic systems: Electrical, optical, thermal models and experimentation techniques," *Energies*, vol. 16, no. 8, p. 3401, 2023, doi:10.3390/en16083401.
- [102] M. C. da Silva, D. A. de L. Brandao, and I. A. Pires, "Evaluating the impact of dirt accumulation on photovoltaic performance: Insights from an experimental plant in brazil," *Energies*, vol. 18, no. 5, p. 1214, 2025, doi:10.3390/en18051214.
- [103] L. C. A. da Costa and G. D. P. da Silva, "Save water and energy: A techno-economic analysis of a floating solar photovoltaic system to power a water integration project in the brazilian semi-arid," *Int. J. Energy Res.*, vol. 45, no. 12, pp. 17 924–17 941, 2021, doi:10.1002/er.6932.
- [104] A. P. B. Ocampo, D. A. A. Cruz, B. A. A. de Vera, J. L. T. Mejia, C. N. H. Sandoval, J. I. S. Soriben, J. I. T. Roman, J.-A. V. Magumbol, O. D. Tubola, and M. Muhi, "Techno-economic feasibility analysis of a floating solar photovoltaic system in san roque dam, philippines," in *Proc. Int. Conf. Netw., Electr. Eng., Comput. Sci., Technol. (IConNECT)*. IEEE, 2023, pp. 115–120, doi:10.1109/IConNECT56593.2023.10326973.



Antonio Wellington Dantas Costa holds a degree in Physics from Unilab, Redenção, CE, Brazil (2023). Postgraduate degree in Renewable Energies from CENTEC, Fortaleza, CE, Brazil (2024). He is currently studying for a master's degree in Mechanical Engineering at UFC, Fortaleza, CE, Brazil.



Leticia de Oliveira Santos is a PhD candidate in Electrical Engineering at Federal University of Ceará (UFC), working on PV modeling. MSc in Mechanical Engineering (2021) on machine learning applications in solar thermal and photovoltaic systems. Additionally, she holds a specialization in Electronic & Electromechanical Engineering, and an MBA in Industrial Modernization. Graduated in Physics at UFC (2017).



Paulo Cesar Marques de Carvalho is graduated in Electrical Engineering at UFC, Fortaleza, CE, Brazil (1989); MSc. in Electrical Engineering at UFPB, Campina Grande, PB, Brazil (1992); Ph.D. in Electrical Engineering at University of Paderborn, Paderborn, Germany (1997). Currently, he is full professor at Electrical Engineering Department at UFC and receives a CNPq research productivity grant.