

# RESULTADOS EXPERIMENTAIS DA INTEGRAÇÃO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS A COBERTURAS VEGETADAS: UMA REVISÃO SISTEMATIZADA DA LITERATURA RECENTE

**Marcela Marçal Maciel Monteiro** – marcela.monteiro@unifesspa.edu.br

**Luis Carlos Macedo Blasques**

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará (IFPA), Campus Belém

**Márcio dos Santos Barata**

Universidade Federal do Pará (UFPA), Instituto de Tecnologia (ITEC)

## 5.3. Energia solar associada ao conforto térmico em ambiente construído e arquitetura bioclimática

**Resumo.** *O presente artigo apresenta uma revisão sistematizada da literatura sobre avaliações experimentais relacionadas à integração de sistemas fotovoltaicos (FV) em coberturas vegetadas de edificações, com foco na geração de eletricidade. Tal revisão está baseada na consulta de artigos técnico-científicos disponibilizados nas mais renomadas bases de dados, considerando um intervalo de tempo limitado aos últimos 10 anos (2013 a 2023), e em trabalhos publicados em anais de eventos científicos de reconhecida qualidade, resultando na avaliação inicial de 121 artigos, sendo 45 deles mais alinhados com o tema deste trabalho, e, finalmente, 17 destes, que apresentavam foco em pesquisas experimentais, foram utilizados como ponto central desta pesquisa. Após as análises, foram observados diversos aspectos relevantes sobre o assunto, os quais evidenciaram que a instalação integrada de módulos fotovoltaicos a coberturas vegetadas foi identificada como uma abordagem que pode contribuir para o resfriamento dos módulos, otimizando a eficiência do sistema. Além disso, observou-se uma lacuna nas pesquisas realizadas em climas tropicais quentes e úmidos, característicos de regiões localizadas na faixa centro-norte do Brasil, ressaltando a necessidade de avaliar o impacto das elevadas temperaturas, alto percentual de umidade relativa do ar e alta incidência de radiação solar ao longo do ano sobre o desempenho dos sistemas FV. Essas descobertas sugerem implicações práticas e oportunidades para futuras pesquisas, destacando a importância da consideração de fatores climáticos específicos em projetos de integração entre sistemas fotovoltaicos e coberturas vegetadas.*

**Palavras-chave:** *Sistema fotovoltaico, Cobertura vegetada, Clima tropical quente e úmido*

## 1. INTRODUÇÃO

Atualmente, os efeitos das alterações climáticas estão cada vez mais evidentes, principalmente no contexto urbano. O fenômeno conhecido como Ilha de Calor Urbana é uma das principais causas de diversas alterações climáticas percebidas nos microclimas urbanos que mais impactam na saúde das pessoas. E nos últimos anos percebe-se a expansão significativa no uso de diferentes estratégias para mitigar ou tornar as cidades mais resilientes aos impactos do clima no futuro (Sattler, Zluwa e Österreicher, 2020). Como exemplo, a adoção de sistemas fotovoltaicos para a geração de energia elétrica vem crescendo, especialmente na forma de geração distribuída, onde os sistemas fotovoltaicos são instalados próximos à carga, conectados diretamente às redes de distribuição de energia, e predominantemente adotados em ambientes urbanos. Tal fato tem levado a estudos mais aprofundados, tanto no meio científico quanto entre projetistas, para se estabelecer a melhor forma de aproveitamento da energia solar, associando os aspectos técnicos com as questões arquitetônicas. Esse contexto reflete a evolução do cenário energético, com a transição para fontes renováveis, e a necessidade de abordagens integradas e interdisciplinares, fazendo ainda uma associação com estratégias bioclimáticas na incorporação de soluções que visem à adequação das edificações às condições climáticas em que estão inseridas.

Dessa forma, um exemplo de solução bioclimática seria a cobertura vegetada, que é indicada para aumentar a inércia térmica do fechamento, proporcionar o resfriamento evaporativo, reduzir a temperatura do ar, interna e externamente, promovendo melhorias no microclima e no ecossistema urbano. Elas também aumentam as áreas permeáveis, auxiliando na retenção e redução do pico de escoamento de água em áreas urbanas, o que é crucial para o manejo sustentável de águas pluviais (Ramshani *et al*, 2020) (Nagengast, Hendrickson e Matthews, 2013). Com esse foco, a integração de sistemas FV a coberturas vegetadas nas edificações não apenas promove a eficiência energética, mas também contribui para a criação de ambientes urbanos mais sustentáveis e ecologicamente conscientes. Essas práticas representam uma abordagem holística para o design e construção de edifícios, considerando tanto os benefícios para o usuário quanto para o meio ambiente, e representam uma estratégia inovadora no campo da sustentabilidade arquitetônica.

Não menos importante, pode-se destacar que a incorporação de sistemas FV nas coberturas vegetadas oferece um potencial aumento na eficiência dos geradores fotovoltaicos. Esse ganho pode ser atribuído ao efeito de resfriamento

proporcionado pela camada de solo vegetado, pois o processo de evapotranspiração das plantas contribui para a dissipação de calor, reduzindo o superaquecimento dos módulos e melhorando seu desempenho global. Apesar das vantagens teóricas, a complexidade da interação entre sistemas FV e coberturas vegetadas demanda pesquisas contínuas. Investigar detalhadamente essa interação é crucial para otimizar o desempenho de ambas as tecnologias, considerando fatores como clima local, tipos de plantas utilizadas e design específico da cobertura vegetada (Ramshani *et al*, 2020). O propósito das pesquisas em andamento é aprimorar o desempenho de sistemas FV integrados a coberturas vegetadas, garantindo que os benefícios sejam maximizados e as potenciais sinergias totalmente exploradas.

## 2. SISTEMA FOTOVOLTAICO (FV) E COBERTURA VEGETADA

A energia solar fotovoltaica é uma das fontes energéticas que mais desperta interesse sob o ponto de vista arquitetônico, justamente pelas suas possibilidades de integração com a edificação, criando um universo amplo para a criatividade dos projetistas. Zomer *et al* (2012) e Santos (2013) corroboram que é crescente o aumento das instalações de sistemas fotovoltaicos nas edificações, por diversos motivos, entre eles o fato da proximidade da geração ao ponto de consumo, o que minimiza os custos associados à transmissão e reduz perdas de distribuição e transmissão. Chivelet e Solla (2010) apontam duas formas de integração à arquitetura, conhecidas como: BIPV (do inglês – *Building Integrated Photovoltaics*), que são integrações feitas, normalmente, no momento da concepção arquitetônica, com os sistemas FV desempenhando duplas funções, ou seja, tanto de geração de energia quanto de substituição de algum elemento de fechamento da edificação, seja cobertura ou paredes verticais; e BAPV (do inglês – *Building Adapted Photovoltaics*), quando os sistemas são incorporados à edificação já existente, ou seja, de forma adaptada ou apoiada sobre uma cobertura ou fachada já existente no edifício, por exemplo.

Coberturas vegetadas também são chamadas na literatura de coberturas verdes, telhados jardim, telhados verdes, tetos verdes, coberturas vivas, dentre outras nomenclaturas similares. São todas coberturas que possuem em suas superfícies algum tipo de vegetação que esteja aplicada a um substrato, que por sua vez provê suporte à mesma. Outros autores se reportam em relação à forma de conceituação desse sistema, como cobertura plana ou inclinada projetada para receber vegetação em sua superfície superior (Dvorak e Volder, 2010). Os sistemas de coberturas vegetadas são caracterizados por uma sucessão de camadas, que podem variar de projeto para projeto, dependendo da composição que for adotada. De uma maneira geral, a configuração básica é composta pelas seguintes camadas, considerando do interior do ambiente para o exterior: laje de apoio; membrana impermeabilizante; camada de drenagem; substrato; e vegetação (Saadatian *et al*, 2013). Podem ser classificadas de três modos, que são: extensivo, com conformação de jardim com vegetação rasteira e altura da estrutura variando de 6 cm a 20 cm, e carga de vegetação de 60 kg/m<sup>2</sup> a 150 kg/m<sup>2</sup>; intensivo, apresenta tamanho médio e plantas maiores, variando entre 15 cm e 40 cm e carga de 180 kg/m<sup>2</sup> a 500 kg/m<sup>2</sup>; ou semi-intensivo, tamanho intermediário com vegetação plantada de tamanho médio, variando de 12 cm a 25 cm e carga de 120 kg/m<sup>2</sup> a 200 kg/m<sup>2</sup>. Outra classificação com relação à forma de implantação, dividida em três categorias, é: sistema pré-cultivado, onde vegetação e camadas são comercializadas em rolos, com a vegetação já desenvolvida ou não; sistemas modulares, compostos por módulos pré-fabricados e implantados diretamente sobre a cobertura já preparada com camada impermeabilizante; e sistemas inteiros ou completos, que são os mais utilizados, formando uma única estrutura vegetada, disposta sobre a superfície da cobertura (Berardi *et al*, 2014).

Com o aumento da população na área urbana, houve também um aumento na área construída de edificações; entretanto, esse crescimento urbano também resultou na contínua redução de áreas e espaços verdes no interior das cidades. A preocupação com a diminuição da vegetação faz com que, cada vez mais, desenvolvam-se técnicas para incluir áreas verdes no espaço urbano. Nesse sentido, as coberturas vegetadas vêm ganhando espaço como uma alternativa a esta demanda, constituindo-se em um sistema sustentável com diversos outros benefícios. Diferenciando-se das coberturas frias, que têm alto valor de albedo, as coberturas vegetadas não são altamente refletoras, porém tem seu fluxo térmico reduzido em função de seus processos físicos de evapotranspiração, decorrente da fotossíntese, além do sombreamento gerado pelas folhagens à camada subjacente de substrato, que atua, por sua vez, como uma camada isolante, por sua massa térmica (Fioretti *et al*, 2008).

A integração dos sistemas de energia solar FV com coberturas vegetadas tem sido objeto de estudo de diversas literaturas, e o maior benefício dessa integração reside na redução das temperaturas registradas, especialmente na parte posterior dos módulos fotovoltaicos. Essa diminuição térmica exerce uma influência direta no desempenho dos sistemas, uma vez que o aumento das temperaturas está correlacionado a uma diminuição proporcional na eficiência de geração. Este fenômeno desperta um considerável interesse em pesquisas, com o propósito de mitigar essas perdas, evidenciando a relevância da instalação de sistemas FV sobre coberturas vegetadas, a fim de otimizar o desempenho global dos sistemas integrados. O aumento na eficiência pode variar entre 0,08% e 8,3%, a depender de condições climáticas, tempo de estudo, entre outros fatores (Ramshani *et al*, 2020). Portanto, as pesquisas não apenas identificam os benefícios térmicos e energéticos da integração de sistemas FV com coberturas vegetadas, mas também exploram soluções práticas e inovadoras para otimizar essa combinação. Ao entender e controlar a dinâmica térmica resultante dessa integração espera-se não apenas elevar a eficiência do sistema de geração, mas também maximizar os ganhos em termos de sustentabilidade e desempenho energético.

### 3. METODOLOGIA

Para desenvolvimento do trabalho foram realizadas pesquisas bibliográficas e pesquisa-ação. Conforme orienta Severino (2013), para a revisão bibliográfica foi feita, inicialmente, uma busca acerca de documentos científicos publicados em diferentes plataformas, como livros, periódicos e artigos científicos, e para a pesquisa-ação foi necessário elaborar um diagnóstico e análise crítica acerca das obras consultadas. Dessa forma, com o objetivo de apresentar uma visão geral do cenário atual da produção científica sobre a integração de sistemas FV às coberturas vegetadas, a presente pesquisa buscou seguir os seguintes procedimentos metodológicos: (i) busca por artigos gerais com definição de critérios de busca nas bases de dados *Web of Science*, *Scopus (Elsevier)* e *Science Direct (Elsevier)*; (ii) escolha dos artigos por meio de seleção e descarte; e (iii) análise dos resultados através de tabelas e gráficos.

A primeira etapa de busca, nas bases de dados do Portal de Periódicos Capes, foi feita a partir da combinação das seguintes expressões em inglês: “*greenroof*” e “*photovoltaic*” no título, resumo e palavras-chave. Para tanto, os filtros considerados foram: intervalo de tempo com trabalhos publicados nos últimos 10 anos (2013 a 2023); artigos científicos publicados em periódicos ou eventos científicos, excluindo-se livros, capítulos de livros e artigos de revisão. Os metadados dos artigos pesquisados foram exportados em formato de valores, em arquivo de extensão “.csv”, e organizados em uma planilha eletrônica. Assim, a busca inicial resultou em 121 trabalhos, sendo 47 artigos na base *Scopus (Elsevier)*, 24 na *Science Direct (Elsevier)* e 50 na *Web of Science*.

A segunda etapa consistiu na escolha dos artigos, e para isso foi feita uma filtragem considerando os critérios de exclusão: artigos duplicados e alinhamento dos títulos e da metodologia à temática pesquisada. Dessa forma, foram identificados 28 artigos duplicados, resultando na totalização de 93 artigos selecionados. A seguir foram aplicados outros critérios de exclusão nos 93 artigos pré-selecionados, a partir da identificação da aderência dos títulos e da metodologia, a partir da leitura do resumo. Na sequência foram excluídos os artigos que não focavam na integração da cobertura verde como estratégia para melhorar a eficiência dos sistemas FV, resultando na seleção de 45 artigos, dentre os quais 17 trataram da temática por meio de pesquisas experimentais, que é foco da presente pesquisa e, por isso, serão aqui apresentados. A Tab. 1 apresenta um resumo sobre o processo completo de seleção dos artigos.

Tabela 1 - Artigos selecionados nas diferentes etapas da pesquisa.

Base de dados	Artigos da busca	Duplicados	Alinhamento dos títulos	Alinhamento da metodologia
<i>Scopus (Elsevier)</i>	47	28	5	3
<i>Science Direct (Elsevier)</i>	24		13	4
<i>Web of Science</i>	50		27	10
<b>Total de artigos</b>	<b>121</b>	<b>93</b>	<b>45</b>	<b>17</b>

(Elaboração própria, 2023)

### 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Algumas análises foram estabelecidas para poder ser feita uma contextualização do atual panorama acerca das pesquisas sobre a temática de estudos experimentais sobre a integração de sistemas FV a coberturas vegetadas. Dessa forma, analisando sob o ponto de vista do ano de publicação, dentro do limite temporal estabelecido na metodologia (10 anos), percebe-se que há certa regularidade nas publicações a partir de 2013, porém não foram encontrados artigos publicados com o enfoque em pesquisas experimentais integrando os dois sistemas no ano de 2017 e 2020 (Fig. 1a). Com relação aos países de origem das publicações, percebe-se que a maioria das pesquisas se concentra nos Estados Unidos e Espanha com três artigos em cada, seguido da Austrália e Colômbia com duas publicações cada, ficando os demais países com uma publicação no período (Fig. 1b).

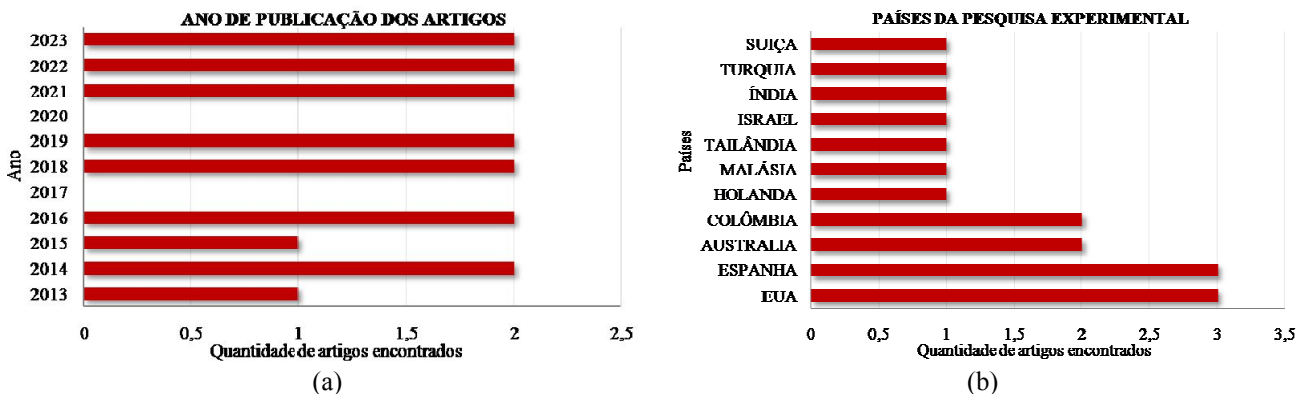


Figura 1 - Artigos selecionados: (a) Ano de publicação; (b) Países. (Elaboração própria, 2023).

Os artigos selecionados que apresentam alinhamento com a metodologia proposta, ou seja, realizaram pesquisas experimentais, estão sistematizados na Tab. 2, organizados por ano de publicação, de forma decrescente, e com as seguintes colunas: referência, descrição do experimento, tempo de medição ou monitoramento, desempenho do sistema FV sobre cobertura vegetada e local de realização da pesquisa, fazendo uma relação com a cidade/país, sua latitude e condições climáticas mais gerais. Destacam-se algumas observações nesse contexto, como o fato das pesquisas na América Latina se restringirem apenas à Colômbia, a ausência de publicações brasileiras com esse enfoque, além do reduzido número de pesquisas em climas tropicais.

Tabela 2 - Sistematização dos 17 artigos alinhados com a metodologia.

Referência	Experimento	Tempo de medição	Desempenho Vegetação+FV	Local / Latitude / clima
Alonso-Marroquin e Qadir (2023)	Módulo monocristalino; 30 cm (ponto mais baixo) e 45 cm (ponto mais alto); Módulo FV sobre telha e módulo FV sobre vegetação (grama Mondo).	15 meses e 8 dias	Sistema FV sobre vegetação gerou 18% a mais de energia	Sydney, Austrália (33° 52' S) – clima temperado
Roest, Voeten e Cirkel (2023)	6 módulos em cada cobertura, Jinko 405 Wp, 32 cm (ponto mais baixo); 20° S; FV sobre superfície betuminosa (preta) e sobre vegetação (sedum).	5 meses (junho à outubro / 2022)	Sistema FV sobre vegetação gerou 4,4% mais de energia	Amsterdã, Holanda (52°35' N) – clima temperado
Fleck <i>et al</i> (2022)	Cobertura em laje aparente: 346 módulos FV 320Wp; inclinação 5°, metade orientada a L e O, 40 cm acima da superfície da laje; Cobertura vegetada (gramíneas e herbáceas): 332 módulos FV 395Wp, 248 und. (15° N); 84 und. (2° L).	237 dias	A produção média horária e geral de energia do FV sobre vegetação foi, respectivamente 4,5% e 23,8% maior que FV sobre a laje	Sydney, Austrália (33° 52' S) – clima temperado
Arenandan <i>et al</i> (2022)	4 módulos FV; 30, 60 e 90 cm de altura; 3° S; Cobertura aparente e vegetada (Sedum).	6 meses	FV/verde e FV/aparente: 1,6%	Selangor, Malásia (2°58' N) – clima tropical
Catalbas, Kocak e Yenipinar (2021)	288 módulos FV monocristalinos; 320 Wp, 33° S.	-	Eficiência foi aumentada em 3% com FV sobre vegetação	Ankara, Turquia (39°96' N) – clima temperado
Kaewpraek <i>et al.</i> (2021)	5 módulos policristalinos (280Wp); 15° de inclinação; cobertura vegetada (planta chita) orientação SE e cobertura aparente SO.	1 ano	Sistema FV / vegetação aumentou em 2% a eficiência de produção de energia	Songkhla, Tailândia (7°11' N) – clima tropical
B, Ck e Sudhakar (2021)	Quatro módulos FV, 15° S, cobertura com revestimento cerâmico; com vegetação, com fibra de coco.	1 mês (maio)	Aumento na máxima potência: FV e fibra de coco (11,34%); FV e vegetação (7,34%)	Kumbakonam, TamilNadu, Índia (10°96' N) – clima tropical
Baumann <i>et al</i> (2019)	Módulos bifaciais (9,09 kWp), inclinação 90° e orientação frontal a Leste (65°) e posterior a oeste (115°). Considerar ângulo azimutal: leste: -90°, sul: 0° e oeste: 90°; cobertura com folhagens verdes e outro com cascalho brilhante e vegetação clara.	4 meses (123 dias)	Alcançou um rendimento específico de 942 kWh/kWp, próximo dos valores típicos de 1000 kWh/kWp com orientação Sul.	Winterthur, Suíça (47°30' N) – clima temperado
Osma-Pinto e Ordóñez-Plata (2019)	23 módulos policristalinos; 10°S; 25cm; 50cm; 75cm e 100cm; concreto aparente e com vegetação (Sedum).	4 meses	FV/verde gerou em média, de 1,0 a 1,3% mais energia por dia.	Bucaramanga, Colômbia (7°07' N) – clima tropical
Alshayeb e Chang (2018)	18 módulos (Yingli Solar 235 Wp), 10° S, 2cm de altura; vegetação (Sedum) e manta asfáltica preta.	1 ano	FV/verde e FV/preto: Jun.: 2,4%; Dez.: 2,7%	Lawrence, Kansas, EUA (38°58' N) – clima temperado

Schindler <i>et al</i> (2018)	Módulos FV (250Wp); cobertura aparente (preta) e com vegetação (Sedum); 20° S; 50 cm de altura (preto) e 30 cm (vegetação).	18 meses	Não houve aumento no desempenho do sistema FV	Haifa, Israel (32°76' N) – clima temperado mediterrâneo
Osma <i>et al.</i> (2016)	2 módulos FV instalados sobre um telhado verde (sedum), 1 módulo sobre superfície preta (manta asfáltica); inclinação 10° S; 50 cm e 75 cm acima da cobertura.	3 semanas	Altura de 0,5m aumentou a produção de energia 2,8%; para a cobertura verde, aumentou a produção de energia em 1%.	Santander, Colômbia (7°1' N) – clima tropical
Ogaili e Sailor (2016)	Módulo policristalino, 30° S, 18 cm e 24 cm; Pintura branca e preta e com vegetação.	2 meses	FV/verde e FV/preto: 1% a 1,2% e FV/verde e FV/branco: 0,70% a 0,75%	Portland, Oregon, EUA (45°52' N) – clima temperado
Lamnatou e Chemisana (2015)	30 módulos policristalinos (230Wp).	-	FV/vegetação gerou um aumento na produção de energia de 4 a 6%	Lleida, Catalunha, Espanha (41°61' N) – clima temperado
Lamnatou e Chemisana (2014)	Células teste (36,5×19,5 cm) em bandejas de madeira; (0,9 ×1,30m <sup>2</sup> ) em uma cobertura com cascalho e vegetação (Sedum e Gazania); 33° Sul; 2 cm.	2 meses (junho / julho)	FV/vegetado x FV/cascalho: aumentos na produção em 1,29% (Gazania) e 3,33% (Sedum)	Lleida, Catalunha, Espanha (41°61' N) – clima temperado
Chemisana e Lamnatou (2014)	Células teste (36,5×19,5 cm) em bandejas de madeira; (0,9 ×1,30m <sup>2</sup> ) em uma cobertura com cascalho e vegetação (Sedum e Gazania); 33° Sul; 2 cm.	2 meses (junho / julho)	Aumento de 1,29–3,33% na saída de potência máxima FV/verde x FV/cascalho.	Lleida, Catalunha, Espanha (41°61' N) – clima temperado
Nagengast, Chris e Matthews (2013)	Módulo policristalino (275Wp), 15° S, 51 cm vegetação (musgo) e 13 cm (membrana preta).	1 ano	FV/verde e FV/preto: 0,5%	Pittsburgh, Pensilvânia, EUA (40°26' N) – clima temperado

(Elaboração própria, 2023)

A análise dos trabalhos destacou consistentemente que a principal vantagem da integração entre módulos fotovoltaicos e coberturas vegetadas é o potencial de resfriamento, resultando em uma maior produção de eletricidade. Esta conclusão foi unanimemente identificada em todos os estudos examinados. A integração desses sistemas favorece o aumento na geração de energia fotovoltaica devido ao efeito de resfriamento derivado do processo de evapotranspiração da vegetação presente nas coberturas. Além do benefício térmico, as pesquisas analisadas trouxeram à tona outros aspectos que contribuem significativamente para o avanço da tecnologia fotovoltaica, especialmente em climas quentes, como os notáveis benefícios ecossistêmicos gerados pelas áreas verdes, pois a presença da vegetação não apenas influencia positivamente a produção de energia, mas também contribui para a promoção de ambientes urbanos mais sustentáveis e resilientes, além de influenciar positivamente outros aspectos ambientais, como a redução do efeito ilha de calor urbano e o aumento da biodiversidade.

As pesquisas experimentais fornecem dados importantes sobre a adaptação e eficácia desses sistemas em diferentes condições climáticas. Portanto, a integração dos dois sistemas não apenas contribui para o aumento da produção de energia, mas também apresenta benefícios ambientais e ecossistêmicos significativos. Os resultados das pesquisas sugerem que essa abordagem inovadora tem o potencial de se tornar uma estratégia valiosa para impulsionar a eficiência e a sustentabilidade dos sistemas fotovoltaicos, especialmente em regiões com climas quentes. Dessa forma, a fim de elucidar como os experimentos ocorreram e quais foram suas abordagens, a seguir são apresentados, mais detalhadamente, sete dos dezessete trabalhos pesquisados, pela sua relevância e caráter experimental, sendo os três artigos com essa temática desenvolvidos nos Estados Unidos, em seguida um trabalho na Colômbia e outro na Malásia, regiões com climas tropicais quentes e úmidos, em seguida uma pesquisa feita na Austrália e outra na Holanda, caracterizando, assim, diferentes condições climáticas.

A pesquisa conduzida por Nagengast, Hendrickson e Matthews (2013) realizou experimentos na cobertura do prédio comercial *Scalo Solar Solutions*, localizado em Pittsburgh, Pensilvânia (EUA) (Fig. 2). O projeto, intitulado “Sunscap”, analisou duas configurações de coberturas sob sistemas FV: uma vegetada utilizando musgo e outra preta com revestimento em Monômero de Etileno Propileno Dieno (EPDM), com monitoramento realizado por um período de um ano (01/07/2011 à 30/06/2012). Para todas as configurações foram utilizados módulos policristalinos (275Wp), instalados com inclinação de 15° e orientados ao sul, com altura da borda inferior do módulo à superfície vegetada de

51 cm, e de 13 cm para a superfície preta. Os resultados mensais indicaram que, em julho, os módulos FV sobre a cobertura vegetada produziram 0,5% mais energia, enquanto que em dezembro, os módulos sobre cobertura preta produziram 2% a mais. Isto indica, no estudo em questão, que a cobertura vegetada teve um desempenho melhor, porém discreto, para condições ambientais com temperaturas acima de 25°C. Embora os telhados verdes possam aumentar a produção de energia fotovoltaica em regiões com temperaturas elevadas, os resultados desse estudo indicam que o impacto da temperatura não foi um fator significativo na produção de energia fotovoltaica e levou a benefícios econômicos modestos. Contudo, devem-se considerar benefícios adicionais da integração de sistemas FV a coberturas vegetadas, que são a capacidade de conseguir reduções nas temperaturas internas do edifício, aumento da vida útil do sistema FV, controle do escoamento de águas pluviais, além de outros benefícios ecossistêmicos para o meio ambiente.

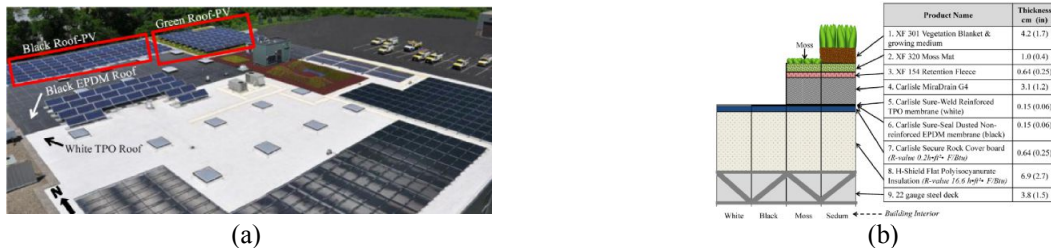


Figura 2 - a) vista aérea da cobertura; b) corte esquemático dos materiais. (Nagengast, Hendrickson e Matthews, 2013)

Outro estudo desenvolvido nos Estados Unidos sobre o desempenho de módulos FV integrados a cobertura vegetada foi realizado por Ogaili e Sailor (2016) na cobertura do Centro de Pesquisa e Ensino de Ciências da Universidade de Portland. O estudo foi conduzido durante dois meses, de 18 de julho a 15 de setembro de 2014, no período de verão, onde foram investigadas três tipologias de telhados distintas: coberturas com pintura branca e preta e com vegetação. A avaliação considerou a instalação dos módulos FV (180Wp) em duas alturas diferentes, 18 e 24 cm, ambas com um ângulo de inclinação de 30° e orientadas ao sul (Fig. 3). Os resultados indicam que o fluxo de ar permanece ligeiramente aumentado sob a altura de 24cm, com velocidade de 0,45 m/s, o que contribuiu para um maior coeficiente médio de transferência de calor, impulsionado pelo aumento da taxa de evapotranspiração da superfície vegetada. Isto resulta em uma melhora no efeito de resfriamento e em uma redução das temperaturas da superfície posterior dos módulos FV em aproximadamente 1,5°C e 3,0°C em comparação com módulos instalados sobre cobertura branca e preta, respectivamente. Em termos de produção de energia, os módulos sobre a cobertura vegetada produziram 1,0% a 1,2% mais energia do que os módulos instalados sobre a cobertura preta e 0,70% a 0,75% mais do que sobre a cobertura branca. É importante salientar que a intensidade desse efeito pode variar de acordo com diferentes fatores, como: projeto arquitetônico, condições de operação, clima local, espécies vegetais utilizadas, na intenção de aumentar os benefícios gerados pelos dois sistemas atuando de forma integrada.

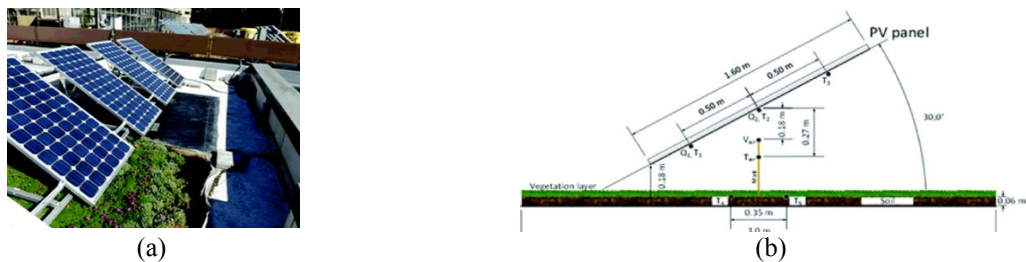


Figura 3 - a) Vista externa do experimento; b) Corte esquemático (sensores) (Ogaili e Sailor, 2016).

Alshayeb e Chang (2018) compararam o desempenho de instalações FV sobre coberturas vegetadas e sobre uma cobertura com membrana betuminosa preta, a fim de avaliar as diferenças horárias de produção de energia. Para tanto, o estudo utilizou a cobertura do prédio Center for Design Research, da Universidade do Kansas em Lawrence, Kansas, EUA. No experimento foram feitas medições dos parâmetros de temperatura do ar e do solo, umidade relativa do ar, temperatura superficial da face posterior do módulo e da produção de energia, no período de um ano (Fig. 4). O sistema foi composto por nove módulos (Yingli Solar, 235 Wp) sobre cada configuração de cobertura, com inclinação de 10°, orientação sul. A análise demonstrou que a diferença média horária de produção de energia foi de aproximadamente 45 Wh, enquanto que a diferença máxima de produção de energia foi de aproximadamente 75 Wh, representando um aumento próximo de 3,3% e 5,3%, respectivamente, pelo sistema FV sobre a cobertura vegetada. A maior diferença foi registrada nos meses mais quentes do ano, como em junho, onde o sistema FV sobre a cobertura vegetada registrou uma produção mensal de 5,7 kWh a mais de eletricidade que o instalado sobre a cobertura preta, o que representa 2,4% a mais de produção de energia, enquanto que em janeiro (inverno), o sistema FV sobre cobertura verde gerou 0,51 kWh a mais em relação à instalação sobre a cobertura preta, um aumento de 1,1% na produção de energia.

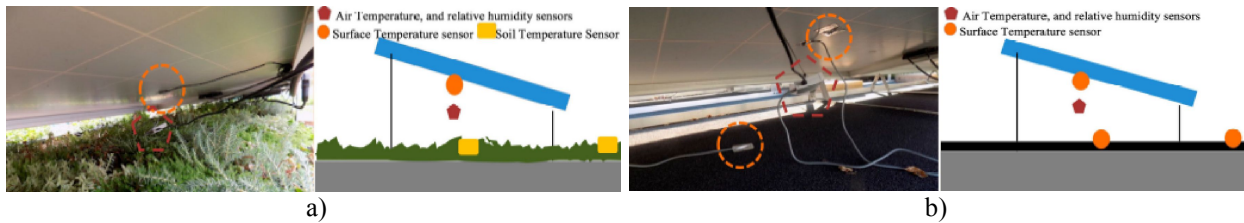


Figura 4 - a) sensores na cobertura vegetada; b) sensores na cobertura preta (Alshayeb e Chang, 2018).

Osma-Pinto e Ordóñez-Plata (2019) conduziram em Bucaramanga, na Colômbia, nas coberturas do Edifício de *Ingeniería Eléctrica* (EIE) e do Edifício de Biblioteca (EB), ambos da Universidade Industrial de Santander, um experimento que avaliou três fatores principais: altura de instalação (25, 50,75 e 100 cm), tipo de cobertura (vegetada e em concreto aparente) e velocidade do ar (sem vento, 1,15m/s e 2,10m/s). Os estudos foram realizados por um período de 4 meses, em que foram monitoradas as variáveis elétricas (potência e energia), ambientais (irradiação solar, temperatura do ar e velocidade do ar) e térmicas (temperatura de operação do módulo FV e temperatura do ar circundante). Ao todo foram instalados 23 módulos policristalinos (255Wp) e 23 microinversores (255W), distribuídos entre os sistemas 1, 2 e 3, com 3, 10 e 10 módulos, respectivamente (Fig. 5). Os sistemas 1 e 2 avaliaram os efeitos da altura de instalação e materiais de cobertura, enquanto que o sistema 3 investigou separadamente os efeitos da velocidade do ar, através de medições forçadas de ventilação. Os resultados destacam que o sistema FV instalado sobre a cobertura vegetada foi capaz de gerar, em média, entre 1,0% a 1,3% mais energia por dia em comparação com a cobertura em concreto aparente, na altura de 50cm. Além disso, velocidades do ar superiores a 1 m/s podem aumentar a geração média diária de energia entre  $1 \pm 0,4\%$  e  $3 \pm 0,4\%$ , sendo este parâmetro mais impactante do que o tipo de telhado e a altura de instalação para irradiações solares superiores a  $700 \text{ W/m}^2$ , mas é insignificante para irradiações solares inferiores a  $300 \text{ W/m}^2$ . Essa melhoria na eficiência de geração de energia reforça a viabilidade e os benefícios potenciais da integração sinérgica de coberturas verdes com sistemas fotovoltaicos.

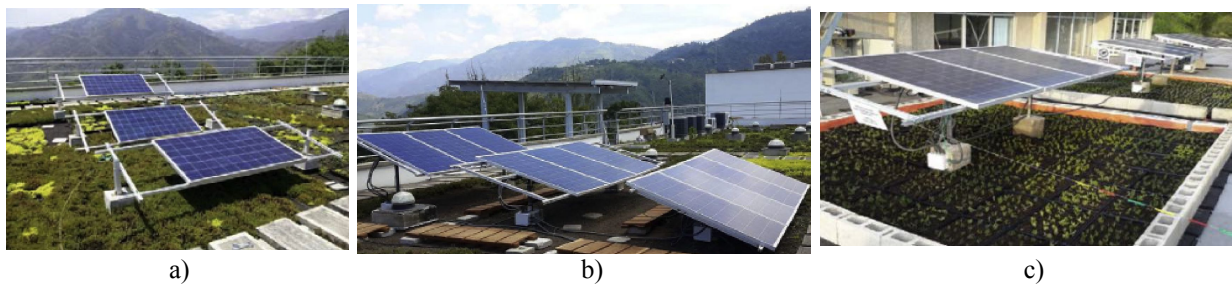


Figura 5 - a) sistema 1 – 3 módulos de 255Wp (765Wp); b) sistema 2 – 10 módulos de 255Wp (2550Wp); c) sistema 3 – 10 módulos de 255Wp (2550Wp) (Osma-Pinto e Ordóñez-Plata, 2019).

O estudo realizado por Arenandan *et al* (2022) avaliou os efeitos do resfriamento proporcionado por um telhado verde na temperatura de módulos FV, e em sua eficiência de geração de energia, instalados em um prédio no campus Putrajaya da *Universiti Tenaga Nasional* (UNITEN), na cidade de Selangor, Malásia (Fig. 6). O experimento utilizou quatro módulos FV, sendo dois sobre superfície vegetada e dois sobre cobertura aparente. Ambos os sistemas foram instalados com inclinação de  $3^\circ$ , orientação sul, e com 6 meses de monitoramento para cada altura da superfície vegetada, 0,3 m, 0,9 m e 0,6 m, respectivamente entre janeiro de 2019 e junho de 2019, entre julho de 2019 e dezembro de 2019, e entre janeiro de 2020 e junho de 2020. Ao comparar sistemas fotovoltaicos em coberturas aparentes com coberturas vegetadas, observaram-se diferenças médias de temperatura de aproximadamente  $1,2^\circ\text{C}$  para as temperaturas ambiente e  $8,6^\circ\text{C}$  para as registradas na face posterior do módulo FV, ou seja, uma redução da ordem de 3,36% e 17%, respectivamente, quando instalados sobre coberturas vegetadas. Esses dados evidenciam o substancial efeito de resfriamento proporcionado pela cobertura vegetada sobre o sistema FV. Além disso, destaca-se um aumento médio de 1,6% na eficiência da geração de energia FV quando comparada a coberturas aparentes. Notadamente, o desempenho da geração de energia foi ainda mais significativo quando a cobertura vegetada foi instalada a 30cm do nível da cobertura, mostrando aumentos de eficiência de 3% e 11% em comparação com alturas de 60cm e 90cm, respectivamente. A maior eficiência associada a uma menor altura pode ser atribuída ao aumento do fluxo de ar gerado pelo maior distanciamento entre a superfície vegetada e o módulo FV, facilitando a transferência de calor e reduzindo ainda mais as temperaturas superficiais do sistema FV.

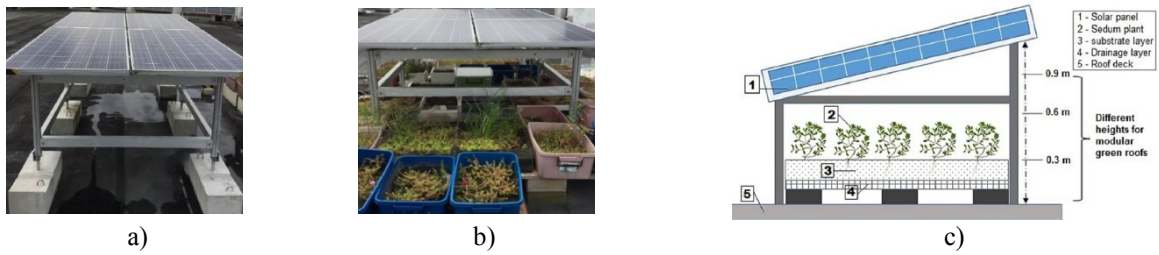


Figura 6 - Configurações do experimento: a) FV sobre cobertura aparente; b) FV sobre cobertura verde; c) Corte esquemático com as diferentes alturas da vegetação (Arenandan *et al.*, 2022).

Alonso-Marroquin e Qadir (2023) realizaram um estudo experimental com protótipos instalados na Universidade de Sydney, Austrália. Durante o período da pesquisa, que se estendeu de dezembro de 2021 a fevereiro de 2023, foram feitos vários testes e medições com relação aos parâmetros de conforto térmico (temperatura do ar e umidade relativa), temperatura da superfície posterior dos módulos FV e rendimento energético do sistema. Os protótipos foram construídos em escala reduzida (1:3), com estrutura de madeira pinho, reforçada com compensado naval e com isolamento em poliestireno expandido (EPS) nas paredes e cobertura. Para o experimento os protótipos apresentavam duas configurações distintas, sendo uma delas com módulo FV e camada vegetada – com distância da camada superficial do solo aos painéis FV de 30 e 45 cm no ponto mais baixo e mais alto, respectivamente, considerando que as bandejas têm 15 cm de altura – e outra com módulo FV instalado diretamente no material de cobertura (Fig. 7). A sinergia do módulo FV sobre a cobertura vegetada manteve o ambiente interno 6% mais confortável que o módulo FV sobre telhado, sugerindo com isso que a combinação dessas tecnologias pode contribuir para um ambiente habitável mais agradável e eficiente termicamente. O protótipo com cobertura vegetada também contribuiu para a redução da temperatura dos módulos FV em até 8°C, resultando em uma maior eficiência e durabilidade do sistema ao longo do tempo. Além disso, o rendimento médio para o sistema FV sobre telhado e sobre vegetação foi de 27,8±1,9Wh e 32,8±2Wh, respectivamente, o que corresponde a um aumento de 18% na energia gerada pelo sistema sobre vegetação, o que reforça a importância da integração de módulos FV com coberturas vegetadas para otimizar a produção de energia, tornando o sistema mais eficiente e sustentável.

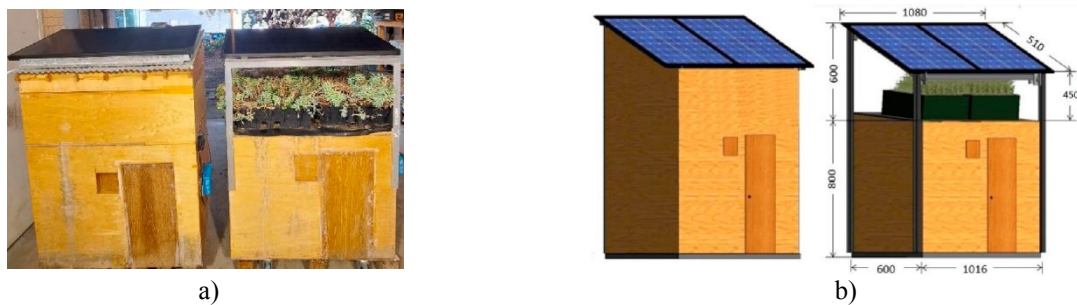


Figura 7 - Configurações do experimento: a) vista frontal dos protótipos; b) modelagem em 3D dos protótipos, com as dimensões em milímetros (mm) (Alonso-Marroquin e Qadir, 2023).

Roest, Voeten e Cirkel (2023) realizaram uma pesquisa comparativa sobre sistemas FV instalados sobre uma cobertura com material betuminoso e sobre uma cobertura vegetada, na cidade de Amsterdam, na Holanda, a fim de investigar se ocorreria um aumento no desempenho do sistema solar FV instalado sobre uma cobertura vegetada com irrigação por capilaridade, em comparação com uma cobertura revestida com betume, em um clima temperado (Fig. 8). Para o experimento foram utilizados 6 módulos (Jinko, 405 Wp) em cada superfície, com inclinação de 20° e orientação sul, com altura do ponto mais baixo do módulo fixa em 32 cm, em ambos os sistemas. Foram monitorados por um período de 5 meses, onde foram avaliados os parâmetros ambientais, elétricos e térmicos dos módulos FV e do solo. Como resultados, o trabalho identificou que a magnitude do efeito de resfriamento foi maior quando a diferença entre a temperatura da superfície do solo e do módulo FV foi maior que 4,6°C. A produção de energia do sistema FV instalado sobre a vegetação foi em média 4,4% maior do que o instalado sobre a superfície betuminosa.

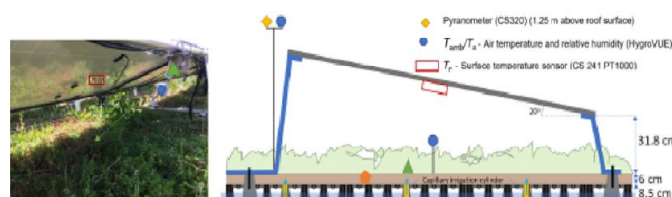


Figura 8 - Vista da costa do módulo e corte esquemático do sistema (Roest, Voeten e Cirkel, 2023).



## 5. CONCLUSÃO

A revisão sistematizada de literatura revelou pesquisas significativas sobre a integração de cobertura vegetada com sistemas FV. Uma constatação comum nos trabalhos foi que as coberturas vegetadas têm o potencial de criar um microclima mais ameno, particularmente em climas quentes, resultando na redução das temperaturas superficiais e do ar circundante. A instalação integrada dessas coberturas aos módulos FV emergiu como uma estratégia eficaz para resfriar os módulos FV, favorecendo o funcionamento mais eficiente do sistema como um todo. Contudo, os resultados sugerem que há espaço para pesquisas futuras explorarem aspectos ainda pouco abordados.

Destacam-se aqui algumas lacunas, apontando para limitações específicas na abordagem geográfica e climática e de publicações no âmbito nacional. Observou-se uma concentração pouco significativa das pesquisas na América Latina, com a Colômbia sendo o único país de destaque. A falta de representação de outros países latino-americanos sugere uma lacuna na diversidade geográfica das investigações, pois a expansão para diferentes regiões da América Latina poderia fornecer uma compreensão mais abrangente dos desafios e oportunidades associados à temática em contextos variados. Assim como, a identificação de um número limitado de pesquisas abordando essa temática em climas tropicais aponta para uma carência na compreensão dessas condições ambientais. Dados os desafios únicos e as características específicas dos climas tropicais, como alta radiação solar e temperaturas elevadas, a escassez de estudos nesse contexto representa uma oportunidade para investigações mais aprofundadas nessa área. Além do fato de que não foram encontradas publicações brasileiras com produções científicas com este enfoque. Dada a crescente importância da sustentabilidade e da energia solar fotovoltaica no contexto brasileiro, a ausência de pesquisas nessa área pode indicar uma oportunidade para iniciativas de pesquisa adicionais e para a expansão do conhecimento nesse domínio.

Em resumo, essas lacunas ressaltam a necessidade de se ampliar a pesquisa para incluir uma variedade de regiões geográficas, especialmente na América Latina, e para explorar mais profundamente os desafios e as soluções específicas em climas tropicais. Além da inclusão de perspectivas brasileiras que também pode enriquecer o conhecimento nesse campo, promovendo avanços significativos na integração sustentável de coberturas vegetadas e sistemas fotovoltaicos.

## REFERÊNCIAS

- Alonso-Marroquin, F., Qadir, G., 2023. Synergy between Photovoltaic Panels and Green Roofs. *Energies*, v. 16, n. 13, 5184, pp. 1-17. <http://dx.doi.org/10.3390/en16135184>.
- Alshayeb, M., Chang, J., 2018. Variations of PV Panel Performance Installed over a Vegetated Roof and a Conventional Black Roof. *Energies*, v. 11, n. 5, p. 1110. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/en11051110>.
- Arenandan, V., Wong, J. K., Ahmed, A. N., Chow, M. F., 2022. Efficiency enhancement in energy production of photovoltaic modules through green roof installation under tropical climates. *Ain Shams Engineering Journal*, v. 13, n. 5, p. 101741. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.asej.2022.101741>.
- B, R.; CK, S.; Sudhakar, K., 2021. Sustainable passive cooling strategy for PV module: a comparative analysis. *Case Studies In Thermal Engineering*, v. 27, p. 101317. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.csite.2021.101317>.
- Baumann, T., Nussbaumer, H., Klenk, M., Dreisiebner, A., Carigiet, F., Baumgartner, F., 2019. Photovoltaic systems with vertically mounted bifacial PV modules in combination with green roofs. *Solar Energy*, v. 190, pp. 139-146. <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2019.08.014>.
- Berardi, U.; Ghaffarianhoseini, A.; Ghaffarianhoseini, A., 2014. State-of-the-art analysis of the environmental benefits of green roofs. *Applied Energy*, v. 115, p. 411-428. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.10.047>.
- Catalbas, M. C.; Kocak, B.; Yenipđnar, B., 2021. Analysis of photovoltaic-green roofs in OSTIM industrial zone. *International Journal Of Hydrogen Energy*, v. 46, n. 27, p. 14844-14856. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.01.205>.
- Chemisana, D., Lamnatou, C., 2014. Photovoltaic-green roofs: an experimental evaluation of system performance. *Applied Energy*, v. 119, pp. 246-256. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.12.027>.
- Chivelet, N. M., Solla, I. F., 2010. *Técnicas de Vedação Fotovoltaica na Arquitetura*. Tradução Alexandre Salvaterra. Porto Alegre: Bookman, 194 p.
- Dvorak, B.; Volder, A., 2010. Green roof vegetation for North American ecoregions: a literature review. *Landscape And Urban Planning*, v. 96, n. 4, p. 197-213. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.landurbplan.2010.04.009>.
- Fioretti, R.; Palla, A.; Lanza, L.G.; Principi, P., 2010. Green roof energy and water related performance in the Mediterranean climate. *Building And Environment*, v. 45, n. 8, p. 1890-1904. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.03.001>.
- Fleck, R.; Gill, R.; Pettit, T.J.; Torpy, F.R.; Irga, P.J., 2022. Bio-solar green roofs increase solar energy output: the sunny side of integrating sustainable technologies. *Building and Environment*, v. 226, p. 109703. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109703>.
- Kaewpraek, C., Ali, L., Rahman, M. A., Shakeri, M., Chowdhury, M. S., Jamal, M. S., Mia, M. S., Pasupuleti, J., Dong, L.K., Techato, K., 2021. The Effect of Plants on the Energy Output of Green Roof Photovoltaic Systems in Tropical Climates. *Sustainability*, v. 13, n. 8, 4505, pp. 1-10. <http://dx.doi.org/10.3390/su13084505>.

- Lamnatou, Chr., Chemisana, D., 2015. Evaluation of photovoltaic-green and other roofing systems by means of ReCiPe and multiple life cycle-based environmental indicators. *Building And Environment*, v. 93, pp. 376-384, <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.06.031>.
- Lamnatou, Chr., Chemisana, D., 2014. Photovoltaic-green roofs: a life cycle assessment approach with emphasis on warm months of mediterranean climate. *Journal Of Cleaner Production*, v. 72, pp. 57-75, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.03.006>.
- Nagengast, A., Hendrickson, C., Matthews, H. S., 2013. Variations in photovoltaic performance due to climate and low-slope roof choice. *Energy and Buildings*, v. 1, n. 64, pp. 493-502. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.05.009>.
- Ogaili, H., Sailor, D.J., 2016. Measuring the Effect of Vegetated Roofs on the Performance of Photovoltaic Panels in a Combined System. *Journal Of Solar Energy Engineering*, v. 138, n. 6, 0610091, pp.1-8. <http://dx.doi.org/10.1115/1.4034743>.
- Osma, G., Ordóñez, G., Hernández, E., Quintero, L., Torres, M., 2016. The impact of height installation on the performance of PV panels integrated into a green roof in tropical conditions. *Wit Transactions On Ecology And The Environment*, v. 205, n. 2, p. 147-156. WIT Press. <http://dx.doi.org/10.2495/eq160141>.
- Osma-Pinto, G., Ordóñez-Plata, G., 2019. Measuring factors influencing performance of rooftop PV panels in warm tropical climates. *Solar Energy*, v. 185, p. 112-123, Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2019.04.053>.
- Ramshani, M., Khojandi, A., Li, X., Omitaomu, O., 2020. Optimal planning of the joint placement of photovoltaic panels and green roofs under climate change uncertainty. *Omega*, v. 90, 101986, pp. 1-20. <http://dx.doi.org/10.1016/j.omega.2018.10.016>.
- Roest, E. V. D., Voeten, J. G.W.F., Cirkel, D. G., 2023. Increasing solar panel output with blue-green roofs in water-circular and nature inclusive urban development. *Building and Environment*, v. 244, p. 110704. <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110704>.
- Saadatian, O., Sopian, K., Salleh, E., Lim, C.H., Riffat, S., Saadatian, E., Toudeshki, A., Sulaiman, M. Y., 2013. A review of energy aspects of green roofs. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 23, p. 155-168. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2013.02.022>.
- Santos, Í. P., 2013. Desenvolvimento de Ferramenta de Apoio à Decisão em Projetos de Integração Solar Fotovoltaica à Arquitetura. Tese de Doutorado, 278 p. Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, UFSC. Florianópolis.
- Sattler, S., Zluwa, I., Österreicher, D., 2020. The “PV Rooftop Garden”: providing recreational green roofs and renewable energy as a multifunctional system within one surface area. *Applied Sciences*, v. 10, n. 5, p. 1791. <http://dx.doi.org/10.3390/app10051791>.
- Schindler, B.Y., Blaustein, L., Lotan, R., Shalom, H., Kadas, G.J., Seifan, M., 2018. Green roof and photovoltaic panel integration: effects on plant and arthropod diversity and electricity production. *Journal of Environmental Management*, v. 225, pp. 288-299. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.08.017>.
- Severino, A.J., 2013. Metodologia do trabalho científico. São Paulo: Cortez, 274 p.
- Zomer, C. D., Nascimento, L., Braun-Grabolle, P., Viana, T., Costa, M. R., Montenegro, A., Bittencourt, A., Santos, I. P., Pereira Júnior, L. C., Kratzenberg, M., Pfitscher, P., Santos, L. R. R. C., Moscardini Júnior, E., Napolini, H., Rütther, R., 2012. Edifício de energia zero com gerador fotovoltaico integrado à arquitetura em clima subtropical. IV CBENS – Congresso Brasileiro de Energia Solar, São Paulo.

## EXPERIMENTAL RESULTS OF THE INTEGRATION OF PHOTOVOLTAIC SYSTEMS TO VEGETATED ROOFS: A SYSTEMATIZED REVIEW OF RECENT LITERATURE

**Abstract.** *This paper presents a systematic review of the literature on experimental evaluations related to the integration of photovoltaic (PV) systems into vegetated building roofs, with focus on electricity generation. This review is based on the analysis of technical-scientific papers available in the most renowned databases, considering a time interval limited to the last 10 years (2013 to 2023), and on works published in the proceedings of scientific events of recognized quality, resulting in the initial analysis of 121 papers, 45 of which were more aligned with the theme of the present work, and finally, 17 of these, which focused on experimental research, were used as the central point of this research. After the analyses, several relevant aspects on the subject were observed, which showed that the integrated installation of photovoltaic modules on vegetated roofs was identified as an approach that can contribute to the cooling of the modules, optimizing the efficiency of the system. Furthermore, a gap was observed in research carried out in hot and humid tropical climates, characteristic of regions located in the Brazilian central-north areas, highlighting the need to evaluate the impact of high temperatures, high percentage of relative air humidity and high incidence of solar radiation throughout the year on the performance of PV systems. These findings suggest practical implications and opportunities for future researches, highlighting the importance of considering specific climate factors in projects integrating photovoltaic systems and vegetated roofs.*

**Keywords:** *Photovoltaic system, Vegetated roof, Hot and humid tropical climate*