

**Avaliações experimentais de sistemas fotovoltaicos integrados às coberturas vegetadas:  
breve revisão sistemática da literatura recente<sup>1</sup>**

*Evaluations of photovoltaic systems integrated with green roofs: a brief systematic review of  
recent literature*

*Evaluaciones de sistemas fotovoltaicos integrados con techos verdes: una breve revisión  
sistemática de la literatura reciente*

Eixo temático: Arquitetura e Urbanismo – Conforto e Qualidade Ambiental

**MONTEIRO, Marcela Marçal Maciel<sup>1</sup>; MORTARI, Letícia<sup>2</sup>; BARBOSA, Ricardo  
Victor Rodrigues<sup>3</sup>; NOLASCO, Gabriel Castañeda<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>marcela.monteiro@unifesspa.edu.br, Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará  
(UNIFESSPA), Brasil

<sup>2</sup>letimortari@gmail.com, Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Brasil

<sup>3</sup>rvictor@fau.ufal.br, Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo (PPGAU),  
Universidade Federal de Alagoas (UFAL), Brasil

<sup>4</sup>gnolasco2@gmail.com, Universidad Autónoma de Chiapas (UNACH), México

**Resumo:** Este artigo objetivou realizar revisão sistemática de literatura acerca de avaliações experimentais sobre a influência da integração de sistemas fotovoltaico e coberturas vegetadas em edificações na geração de energia FV. Para tanto, foi realizada busca em duas bases de dados: *Scopus* (Elsevier) e *Web of Science*, aplicando filtro temporal para trabalhos publicados nos últimos 10 anos (2021 a 2011) e limitando-se a artigos científicos publicados em periódicos ou eventos científicos. A busca resultou em 96 artigos. Foram excluídos os artigos duplicados e os que não apresentavam aderência ao tema, resultando na seleção de 32 artigos, dos quais 16 artigos abordavam a temática por meio de pesquisas experimentais. Estes foram analisados nesta pesquisa. A análise dos artigos selecionados possibilitou identificar pesquisas relevantes, as quais evidenciaram que a instalação integrada de cobertura vegetada aos módulos fotovoltaicos pode contribuir para resfriar os painéis, permitindo o funcionamento desse sistema com maior eficiência. Por fim, constatou-se a reduzida quantidade de pesquisas realizadas em climas tropicais e a necessidade de avaliar a influência das elevadas temperaturas e umidade do ar e a alta incidência de radiação solar direta sobre as superfícies das coberturas ao longo de todo ano sobre o desempenho do sistema FV.

**Palavras-chaves:** Telhado verde; painéis fotovoltaicos; sistema FV; eficiência energética; sustentabilidade.

**Abstract:** *This article aimed to conduct a systematic literature review on experimental evaluations on the influence of the integration of photovoltaic systems and vegetated roofs in buildings in the generation of PV energy. For this, a search was performed in two databases: Scopus (Elsevier) and Web of Science, applying a temporal filter for papers published in the last 10 years (2021 to 2011) and limited to scientific articles published in journals or*

---

<sup>1</sup>MONTEIRO, Marcela Marçal; MORTARI, Letícia; BARBOSA, Ricardo Victor Rodrigues; NOLASCO, Gabriel Castañeda. Avaliações experimentais de sistemas fotovoltaicos integrados às coberturas vegetadas: breve revisão sistemática da literatura recente. In: CONGRESSO ARAGUAIENSE DE CIÊNCIAS EXATA, TECNOLÓGICA E SOCIAL APLICADA, p. xx, 2021, Santana do Araguaia. **Anais [...]** Santana do Araguaia: III CONARA, 2021.

*scientific events. The search resulted in 96 articles. Duplicate articles and those that did not adhere to the theme were excluded, resulting in the selection of 32 articles, of which 16 articles addressed the theme through experimental research. These were analyzed in this research. The analysis of the selected articles made it possible to identify relevant research, which showed that the integrated installation of vegetated coverage to photovoltaic modules can contribute to cooling the panels, allowing the operation of this system more efficiently. Finally, it was verified the reduced amount of research conducted in tropical climates and the need to evaluate the influence of high air temperatures and humidity and the high incidence of direct solar radiation on the surfaces of the roofs throughout the year on the performance of the PV system.*

**Keywords:** *Green roof; photovoltaic panels; PV system; energy efficiency; sustainability.*

**Resumen:** *Este artículo tuvo como objetivo realizar una revisión sistemática de la literatura sobre evaluaciones experimentales sobre la influencia de la integración de sistemas fotovoltaicos y cubiertas con vegetación en edificios en la generación de energía FV. Para ello, se realizó una búsqueda en dos bases de datos: Scopus (Elsevier) y Web of Science, aplicando filtro temporal para artículos publicados en los últimos 10 años (2021 a 2011) y limitado a artículos científicos publicados en revistas o eventos científicos. La búsqueda resultó en 96 artículos. Se excluyeron los artículos duplicados y los que no se adhirieron al tema, lo que resultó en la selección de 32 artículos, de los cuales 16 artículos abordaron el tema a través de investigaciones experimentales. Estos fueron analizados en esta investigación. El análisis de los artículos seleccionados permitió identificar investigaciones relevantes, que demostraron que la instalación integrada de cobertura vegetada a módulos fotovoltaicos puede contribuir a enfriar los paneles, permitiendo el funcionamiento de este sistema de manera más eficiente. Finalmente, se verificó la reducida cantidad de investigación realizada en climas tropicales y la necesidad de evaluar la influencia de las altas temperaturas y humedad del aire y la alta incidencia de radiación solar directa en las superficies de los techos durante todo el año en el rendimiento del sistema FV.*

**Palabras clave:** *Techo verde; paneles fotovoltaicos; sistema fotovoltaico; eficiencia energética; sustentabilidad.*

## **1 Introdução**

Nos últimos anos, observou-se crescente disseminação da utilização de sistemas fotovoltaicos para a geração de energia elétrica, especialmente sob a forma de geração distribuída, que corresponde aos sistemas interligados às redes das distribuidoras de energia, predominantemente em meios urbanos. Essa disseminação tem provocado intensas discussões no meio técnico-científico e entre projetistas quanto ao melhor aproveitamento da energia solar para a produção de eletricidade, aliando tanto questões estritamente técnicas, inerentes ao sistema de geração de eletricidade, quanto, mais recentemente, a questões arquitetônicas, buscando a melhor integração possível dos elementos fotovoltaicos à envoltória da edificação.

Diversas técnicas tem sido desenvolvidas por arquitetos ou engenheiros para integrar ou adaptar estes módulos à arquitetura por meio das coberturas, fachadas, brises com vantagens e desvantagens específicas dependendo da localização geográfica, características da edificação, conforto térmico, tecnologia de módulos e outros. As regiões Norte e Nordeste, em especial, apresenta alto índice de irradiação solar comparada a outras regiões, porém, este tipo de tecnologia ainda apresenta baixíssimos níveis de utilização na região sendo um dos entraves à falta de uma melhor divulgação das vantagens desta tecnologia e a correta aplicação por profissionais em edificações na região.

Assim, a crescente utilização dos sistemas FV despertou maior interesse no uso de outras técnicas que possam incorporar conceitos bioclimáticos e sustentáveis nas edificações, como as coberturas vegetadas, que vem ganhando espaço e reconhecimento como prática projetual que visa promover diversos benefícios, tanto do ponto de vista da edificação – na redução de temperatura internas e aumento de umidade relativa do ar – quanto do ambiente citadino – pelas suas propriedades ecossistêmicas, resfriamento e umidificação do ar na atmosfera próximo ao solo e aumento de áreas permeáveis, ajudando na retenção e redução do pico de escoamento de água em grandes centros urbanos. Dessa forma, a incorporação do emprego de sistemas FV às coberturas vegetadas surge como uma alternativa de integrar duas técnicas sustentáveis, a fim de proporcionar inúmeras vantagens, como aumento na eficiência dos geradores fotovoltaicos, atribuído ao efeito de resfriamento da camada do solo vegetado devido, especialmente, ao processo de evapotranspiração. Contudo, diversas pesquisas foram e continuam sendo realizadas com fito de investigar a real interação dessas duas tecnologias, como forma de melhorar o desempenho de ambos os sistemas.

As coberturas vegetadas foram primeiramente concebidas com objetivo estético. Estima-se que o Jardim Suspenso da Babilônia é o registro mais antigo da implantação de vegetação acima das construções. A tecnologia do telhado verde como um instrumento funcional para a civilização tem sua origem em diferentes regiões do mundo. Na Escandinávia, os telhados eram cobertos com uma mistura de terra e grama como forma de isolamento térmico. Abaixo dessa camada eram colocadas pesadas vigas de madeira intercaladas com cascas de árvores para a impermeabilização do telhado (RODRIGUEZ, 2006). Nos anos 1970, na Alemanha, organizações privadas juntamente com universidades e centros de pesquisa começaram a desenvolver estudos envolvendo o telhado verde e suas aplicações, com vistas ao desenvolvimento de habitats ecológicos em áreas urbanas, balanço energético, sistemas de drenagem e impermeabilização, planejamento, entre outros.

As coberturas vegetadas são conhecidas por converter a superfície de um telhado convencional em um espaço multifuncional, utilizando, para isso, a vegetação (SILVA, BARBOSA, BATISTA, 2020). Essa prática tem sido utilizada extensamente na Alemanha por mais de 30 anos. Em 2002, mais de 12% dos telhados planos naquele país possuíam algum tipo de vegetação (HARZMANN, 2002; CARTER; BUTLER, 2008). A prática das coberturas vegetadas melhora a qualidade de vida da população, pois novas áreas verdes surgem onde antes não havia possibilidade de existência de vegetação devido ao adensamento urbano por construções. Além disso, as coberturas vegetadas promovem o embelezamento das áreas urbanas, auxiliam na drenagem das águas pluviais e proporcionam isolamento térmico e acústico à edificação (RODRIGUES, 2017).

Os sistemas de módulos fotovoltaicos e coberturas vegetadas tem, ambos, suas vantagens e são sistemas altamente sustentáveis cada vez mais utilizados, porém, na maioria dos casos, esses sistemas são implantados separadamente. Questionam-se, então, quais as vantagens e desvantagens do uso integrado de ambos os sistemas. Nesse sentido, o presente artigo buscou realizar breve revisão da literatura acerca do uso integrado de sistema fotovoltaico com cobertura verde em edificações, com vistas a identificar os benefícios do uso integrado dos dois sistemas na melhoria da eficiência energética e geração de energia na edificação.

## **2 Referencial teórico**

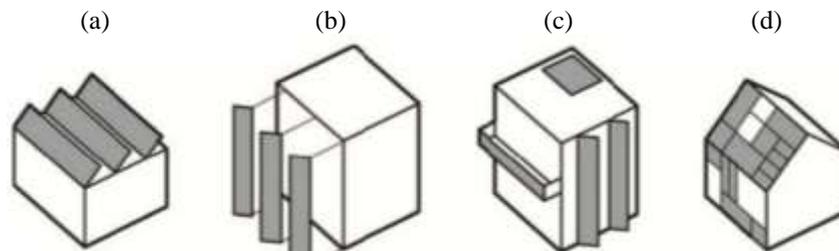
### **2.1 Sistemas fotovoltaicos integrados e adaptados à arquitetura**

A fonte solar fotovoltaica é aquela que apresenta as melhores possibilidades de integração à arquitetura, dentre todas as demais fontes de geração de eletricidade. Os módulos

fotovoltaicos podem ser incluídos de diversas maneiras nos sistemas de vedação externa de uma edificação, produzindo parte ou toda energia utilizada pelo edifício. Além disso, a geração fotovoltaica não ocasiona ruído ou emissão de gases em seu funcionamento e necessita de pouca manutenção, características ideais para instalação no meio urbano e integrado a edificações (RÜTHER, 2004). Segundo Santos (2013), as instalações de sistemas fotovoltaicos em edificações vêm ganhando espaço no mercado e são apontadas como o futuro da tecnologia, já que as instalações integradas à edificação não utilizam áreas livres, mas áreas já em uso. Zomer (2012) cita que outra vantagem da instalação desses sistemas em edificações é a geração de energia próximo ao ponto de consumo, gerando energia para a rede de baixa ou média tensão em nível de distribuição, eliminando os custos associados à transmissão de energia que são necessários nas grandes centrais geradoras e minimizando as perdas de transmissão e de distribuição.

Atualmente, existem duas maneiras de integrar os geradores fotovoltaicos à edificação: uma que é chamada de BIPV (sigla em inglês para *Building Integrated Photovoltaics*), e a outra conhecida como BAPV (sigla em inglês para *Building Adapted Photovoltaics*). Os BIPVs são, normalmente, integrações elaboradas durante o processo de projeto da edificação, com os elementos FV desempenhando dupla função, e os BAPVs acontecem quando a geração FV é inserida como uma alteração posterior, com adição de elementos a um edifício já existente, de forma adaptada e não plenamente integrada ao mesmo. Dentre as formas de integração e adaptação, a Figura 1 apresenta quatro possibilidades de instalação dos sistemas FV, a saber: (a) atuando apenas para geração de energia elétrica; (b) instalados sobre estrutura independente; (c) atuando em mais de uma função; e (d) fazendo parte da composição estética do edifício (DIAS, 2014).

Figura 1: Possibilidades de integração fotovoltaica: a) elemento técnico (na cobertura); b) fixado à estrutura independente (elemento de proteção externa); c) com mais de uma função; d) fazendo parte da composição estética.



Fonte: Dias (2014).

Santos (2013), comenta que a tecnologia fotovoltaica vem se desenvolvendo há muito tempo, mas ainda há poucos exemplos de edificações com integração de sistemas fotovoltaicos à arquitetura. Para obter-se qualidade no BIPV, esses módulos devem apresentar qualidade técnica, substituindo outros elementos construtivos do sistema de vedações e não simplesmente lhes sobrepondo. Observa-se, com frequência, que muitas das integrações FV ainda consideram os módulos apenas como equipamento para a geração de energia, sem preocupação com a composição da edificação, resultando em integrações não satisfatórias. Essas integrações acabam por não contribuir favoravelmente para a disseminação da tecnologia FV em virtude de vincular-se a imagem dos módulos à arquitetura com estética muitas vezes duvidosa.

A participação limitada dos projetistas comprometidos com a integração arquitetônica nos projetos de integração fotovoltaica em edificações tem gerado projetos em que os módulos se situam como elementos alheios à composição formal (SANTOS, 2013). Dessa forma, torna-se

importante o estudo e participação dos arquitetos e projetista na definição das abordagens de projeto, definindo, juntamente com profissionais das engenharias a melhor tecnologia FV para o fim a que se destina.

Outra forma de integração que vem sendo estudada é a integração dos sistemas FV com as coberturas vegetadas, constituindo o foco do presente artigo. Observa-se que o maior ganho na proposta de integração dos sistemas está na redução das temperaturas registradas, principalmente, na parte posterior dos módulos, influenciando diretamente no seu desempenho, uma vez que, na medida que as temperaturas se elevam, a eficiência de geração reduz na mesma proporção, fato que desperta grande interesse em pesquisas, a fim de tentar reduzir essas perdas, como por exemplo na instalação de sistemas FV sobre coberturas vegetadas.

## 2.2 Cobertura verde e seus benefícios

Com o aumento da população na área urbana, houve também um aumento na área construída por edificações com vistas a atender a demanda populacional. Entretanto, esse crescimento urbano também resultou na contínua redução de áreas e espaços verdes no interior das cidades. A preocupação com adiminuição 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.

As coberturas vegetadas trazem muitas vantagens para as edificações onde são incluídas e para o meio que as rodeiam. Além da estética urbana, valorizando os imóveis que os contêm, as coberturas vegetadas podem ajudar no controle de enchentes, eficiência energética, por serem ótimos isolantes térmicos, melhoram a qualidade do ar e também podem servir como isolantes acústicos. Porém, as coberturas vegetadas precisam ser muito bem instaladas para não gerar infiltrações de água e umidade nas edificações, o que gera um alto custo de implantação e manutenção.

As coberturas vegetadas podem ter três classificações principais, a saber: (a) extensivo, quando tem configuração de jardim com uma pequena vegetação rasteira, altura da estrutura de 6 cm a 20 cm e carga variando de 60 kg/m<sup>2</sup> a 150 kg/m<sup>2</sup> de vegetação; (b) intensivo, quando é de tamanho médio e possui grandes plantas na estrutura entre 15 cm e 40 cm, com carga variando de 180 kg/m<sup>2</sup> a 500 kg/m<sup>2</sup>; ou (c) semi-intensivo, de tipo intermediário com uma vegetação média plantada de 12 cm a 25 cm e carga variando de 120 kg/m<sup>2</sup> a 200 kg/m<sup>2</sup>.

## 3 Metodologia

A revisão de literatura consistiu, em uma primeira etapa, na definição de estratégia de busca dos artigos. Nesta etapa, foi realizada busca em duas bases de dados: *Scopus* (Elsevier) e *Web of Science*, a partir dos termos combinados em inglês: “green roof” AND “photovoltaic\*”, no título, resumo e palavras-chave. Para busca, foi aplicado filtro temporal para trabalhos publicados nos últimos 10 anos (2021 a 2011), limitando-se a artigos científicos publicados em periódicos ou eventos científicos, excluindo-se livros, capítulos de livros e artigos de revisão. O objetivo da estratégia de busca foi retratar o cenário atual das pesquisas que abordassem a integração dos dois sistemas em coberturas. A busca resultou em 96 trabalhos, sendo 47 artigos na base *Scopus* (Elsevier) e 49 artigos na base *Web of Science*.

Os metadados dos artigos foram exportados em formato de valores separados por vírgula (extensão “.csv”) e tabulados em uma planilha eletrônica do Microsoft Excel. Nesta etapa, foram identificados 28 artigos duplicados, resultando na totalização de 68 artigos selecionados na primeira etapa da pesquisa.

A segunda etapa consistiu na filtragem dos 68 artigos pré-selecionados a partir da identificação da aderência dos artigos com a temática da referida revisão de literatura a partir da leitura do resumo. Nessa etapa, foram excluídos os artigos que não abordavam a integração da cobertura verde como forma de gerar benefícios para o desempenho dos sistemas fotovoltaicos, resultando na seleção de 31 artigos, dos quais 16 artigos abordavam a temática por meio de pesquisas experimentais. Aqui será apresentada análise apenas dos artigos com pesquisas experimentais. A quantidade de artigos correspondente às diferentes etapas está sintetizada na Tabela 1.

Tabela 1: Quantidade de artigos encontrados diferentes etapas da revisão sistematizada.

BASE DE DADOS	ARTIGOS DA BUSCA	DUPLICADOS	CORRELATOS AO TEMA	ABORDAGENS EXPERIMENTAIS
Scopus (Elsevier)	47	28	31	16
Web of Science	49			
<b>TOTAL DE ARTIGOS</b>	<b>96</b>	<b>68</b>		

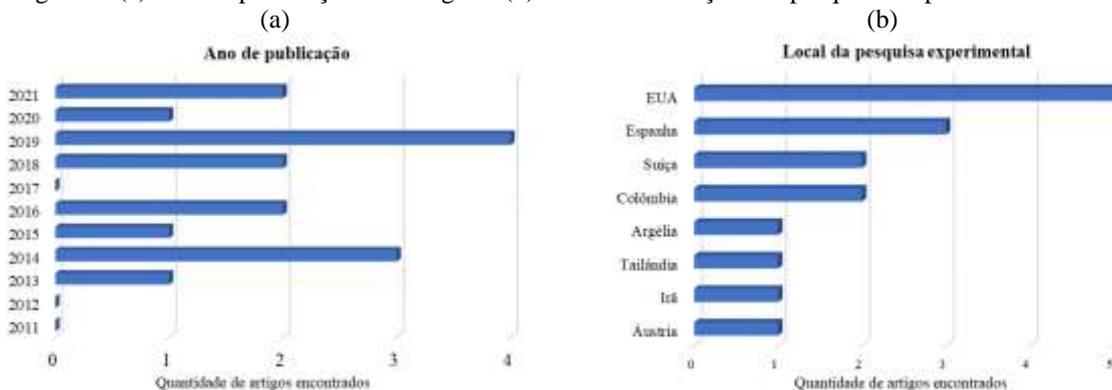
Fonte: Autores, 2021.

#### 4 Resultados

Os artigos selecionados e analisados nesta revisão de literatura estão sistematizados no Quadro 1, organizados do ano de publicação de forma decrescente, contendo as seguintes informações: ano de publicação, título do artigo, nome do periódico ou do evento científico, área do conhecimento e local da pesquisa. Observou-se que oito, correspondendo a 50% dos artigos selecionados, são provenientes da área de conhecimento Combustíveis Energéticos, seguido pela área de Engenharia com sete artigos. Outras áreas também aparecem são: Tecnologia das Construções, Tecnologia da Ciência e Ciências Ambientais, com três artigos cada. Ressalta-se que as classificações das áreas de estudo apresentadas foram fornecidas pelas respectivas bases de dados e que alguns artigos podem estar enquadrados em mais de uma área de conhecimento (Quadro 1).

A análise a partir do ano de publicação mostra que há uma constância nas publicações com a temática pesquisada, com trabalhos publicados a partir de 2013. Não foram encontrados artigos publicados nos anos 2017, 2011 e 2012 (Figura 2a). Quanto ao local de realização das pesquisas, observou-se que a maioria dos artigos selecionados abordam pesquisas realizadas nos Estados Unidos (5 artigos), seguido pela Espanha (3 artigos). Merece destaque o fato das pesquisas na América Latina estarem restritas apenas à Colômbia e também a ausência de pesquisas brasileiras (Figura 2b). Também cabe destacar a reduzida quantidade de pesquisas realizadas em cidades tropicais (Quadro 2).

Figura 2: (a) Ano de publicação dos artigos e (b) local de realização das pesquisas experimentais analisadas.



Fonte: Autores, 2021

Quadro 1: Sistematização dos 16 artigos selecionados na revisão sistemática de literatura.

ANO	AUTOR	TÍTULO	PERIÓDICO	ÁREA DO CONHECIMENTO	LOCAL
2021	Cavadini G.B., Cook L.M.	Green and cool roof choices integrated into rooftop solar energy modelling	Applied Energy	Energia, Engenharia e Ciência Ambiental	Zurique (Suíça)
2021	Kaewpraek, Chila; Ali, Liaqat; Rahman, Md. Arefin; Shakeri, Mohammad; Chowdhury, M. S.; Jamal, M. S.; Mia, Md. Shahin; Pasupuleti, Jagadeesh; Dong, Le Khac; Techato, Kuaanan	The Effect of Plants on the Energy Output of Green Roof Photovoltaic Systems in Tropical Climates	Sustainability	Ecologia de Ciências Ambientais; Tecnologia científica	Distrito de Bo Yang, em Songkhla (Tailândia)
2020	Ramshani M., Khojandi A., Li X., Omिताomu O.	Optimal planning of the joint placement of photovoltaic panels and green roofs under climate change uncertainty	Omega (United Kingdom)	Negócios, Gestão e Contabilidade Ciências da Decisão	Knoxville, Tennessee (EUA)
2019	Movahhed, Yasin; Safari, Amir; Motamedi, Sina; Khoshkhou, Ramin Haghighi	Simultaneous use of PV system and green roof: A techno-economic study on power generation and energy consumption	Renewable energy integration with mini/microgrid	Combustíveis Energéticos	Tehran Province, Tehran, Attar (Irã)
2019	Abderrezek, Mahfoud; Fathi, Mohamed; Zerade, Toufik; Ayad, Mohammed	Impact of Installation Substrates on Photovoltaic Modules Energy Yield	Proceedings of 2019 7th international renewable and sustainable energy conference (irsec)	Energy Fuels Engineering Science Technology	Tipaza (Argélia)
2019	Baumann, Thomas; Nussbaumer, Hartmut; Klenk, Markus; Dreisiebner, Andreas; Carigiet, Fabian; Baumgartner, Franz	Photovoltaic systems with vertically mounted bifacial PV modules in combination with green roofs	Solar energy	Combustíveis Energéticos	Winterthur (Suíça)
2019	Osma-Pinto, German; Ordonez-Plata, Gabriel	Measuring factors influencing performance of rooftop PV panels in warm tropical climates	Solar energy	Combustíveis Energéticos	Bucaramanga (Colômbia)
2018	Moren, Maria Soledad Penaranda; Korjenic, Azra	Investigation of the year-round thermal buffering effect of a combined green roof with photovoltaics	Bauphysik	Tecnologia de Construção de Edifícios	Viena (Áustria)
2018	Alshayeb, Mohammed J.; Chang, Jae D.	Variations of PV Panel Performance Installed over a Vegetated Roof and a Conventional Black Roof	Energies	Combustíveis Energéticos	Lawrence, Kansas (EUA)

(Continua)

(Continuação)

2016	Osma, G.; Ordonez, G.; Hernandez, E.; Quintero, L.; Torres, M.	The impact of height installation on the performance of PV panels integrated into a green roof in tropical conditions	Energy Production And Management In The 21st Century II: The Quest For Sustainable Energy	Combustíveis Energéticos; Outros tópicos de tecnologia da ciência	Santander (Colômbia)
2016	Ogaili, Hamid; Sailor, David J.	Measuring the Effect of Vegetated Roofs on the Performance of Photovoltaic Panels in a Combined System	Journal Of Solar Energy Engineering- Transactions Of The Asme	Combustíveis Energéticos; Engenharia	Portland, Oregon (EUA)
2015	Lamnatou, Chr; Chemisana, D.	Evaluation of photovoltaic-green and other roofing systems by means of ReCiPe and multiple life cycle-based environmental indicators	Building and Environment	Tecnologia de Construção de Edifícios; Engenharia	Lleida, Catalunha (Espanha)
2014	D. Chemisana, Chr. Lamnatou	Photovoltaic-green roofs: An experimental evaluation of system performance	Applied Energy	Combustíveis Energéticos; Engenharia	Lleida, Catalunha (Espanha)
2014	Sailor, David J.; Vuppuluri, Prem	Energy performance of sustainable roofing systems	Proceedings of the asme summer heat transfer conference - 2013, vol 4	Engenharia; Termodinâmica	Portland, Oregon (EUA)
2014	Lamnatou, Chr.; Chemisana, D.	Photovoltaic-green roofs: a life cycle assessment approach with emphasis on warm months of Mediterranean climate	Journal of cleaner production	Engenharia; Ecologia das Ciências Ambientais; Tecnologia da ciência	Lleida, Catalunha (Espanha)
2013	Nagengast, Amy; Hendrickson, Chris; Matthews, H. Scott	Variations in photovoltaic performance due to climate and low-slope roof choice	Energy and buildings	Tecnologia de Construção de Edifícios	Pittsburgh, Pensilvânia (EUA)

Fonte: Autores, 2021

Quadro 2: Local (país e cidade) e tipo climático encontrados nas pesquisas experimentais descritas nos artigos selecionados.

PAÍS	CIDADE	LATITUDE	CLIMA
Suíça	Zurique	47°38' N	Temperado
Tailândia	Distrito de Bo Yang, em Songkhla	7°11' N	Tropical
EUA	Knoxville, Tennessee	35°57' N	Temperado
Irã	Tehran Province, Tehran, Attar	35°45' N	Temperado
Argélia	Tipaza	35°59' N	Temperado
Suíça	Winterthur	47°45' N	Temperado
Colômbia	Bucaramanga	7°1' N	Tropical
Áustria	Viena	48°20' N	Temperado
EUA	Lawrence, Kansas	38°58' N	Temperado
Colômbia	Santander	7°13' N	Tropical
EUA	Portland, Oregon	45°52' N	Temperado
Espanha	Lleida, Catalunha	41°61' N	Temperado
Espanha	Lleida, Catalunha	41°61' N	Temperado
EUA	Portland, Oregon	45°52' N	Temperado
Espanha	Lleida, Catalunha	41°61' N	Temperado
EUA	Pittsburgh, Pensilvânia	40°26' N	Temperado

Fonte: Autores, 2021

Por fim, com o objetivo de identificar os termos e as palavras chaves mais recorrentes nos artigos selecionados, foi elaborada uma nuvem de palavras. Para tanto, foi utilizado a plataforma *on-line* Mentimeter. O tamanho dos termos resultantes na nuvem de palavras corresponde diretamente com a frequência com que os mesmos aparecem como palavras-chave nos artigos selecionados. Nesse sentido, destacam-se os seguintes termos: “telhados verdes”, com maior evidência, seguido por “fotovoltaica”, “energia solar” e “painel fotovoltaico”. Cabe destacar, ainda, os termos “energia renovável” e “eficiência energética”. (Figura 3)

Figura 3: Nuvem de palavras



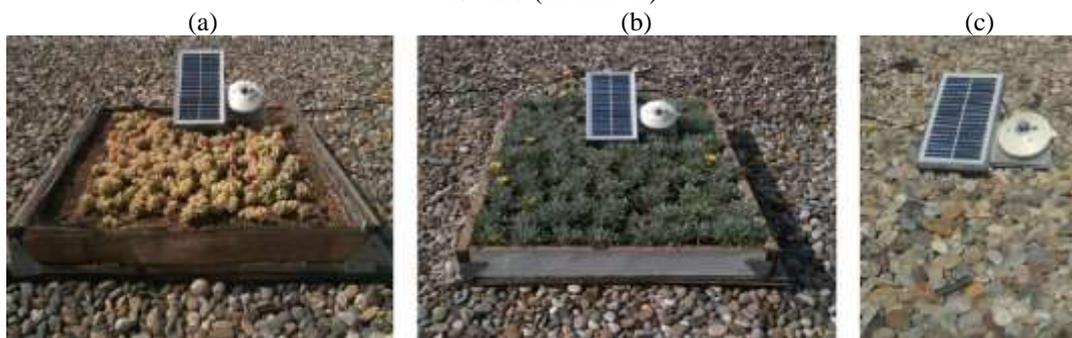
Fonte: Autores, 2021



Os resultados dos testes mostraram que o fluxo de ar manteve-se levemente aumentado sob a altura de 24cm com 0,45m/s. Para a altura de 18cm, registrou 0,32m/s. Esse fato resultou em maior coeficiente médio de transferência de calor gerado pelo aumento da taxa de evaporação da superfície vegetada, o que proporcionou melhora no efeito de resfriamento e, conseqüentemente, reduziu as temperaturas da superfície do painel fotovoltaico em aproximadamente 1,5 °C a 3,0°C em relação aos painéis instalados sobre telhados convencionais. Nesse sentido, os painéis sobre a cobertura vegetada produziram de 1,0% a 1,2% mais energia do que os painéis instalados sobre o telhado preto e 0,70% a 0,75% mais energia do que sobre os painéis instalados sobre telhados brancos. Contudo, os autores relatam que a magnitude do efeito pode variar de acordo com diversos fatores, como o isolamento da cobertura, o projeto arquitetônico e as condições operacionais. Além disso, consideram-se, ainda, a tipologia de vegetação utilizada e as condições climáticas – situações que devem ser mais bem avaliadas em conjunto com os sistemas fotovoltaico, na intenção de aumentar as vantagens do emprego das coberturas vegetadas em áreas urbanas.

Pesquisa realizada na Espanha ratifica o efeito de resfriamento provocado pelos processos de evapotranspiração do vegetal, o qual favorece significativamente o desempenho dos módulos fotovoltaicos. Chemisana e Lamnatou (2014) investigaram dois tipos de espécies vegetais autóctones (*Gazania rigens* e *Sedum clavatum*), no período de verão de clima mediterrâneo. Os autores usaram ambas espécies como base para o sistema FV instalados na Universidade de Lleida. As duas espécies são bem adaptadas ao clima Mediterrâneo. Apesar de se comportarem de forma diferente, têm boas características como plantas de telhado verde. O comportamento sobre as coberturas vegetadas foi comparado com a instalação do sistema FV sobre superfície em cascalho, tomado como telhado de referência (Figura 5). Os resultados dos experimentos mostraram que a vegetação proporciona efeito positivo sobre o desempenho elétrico dos sistemas fotovoltaicos. Em um período de cinco dias de experimento, observou-se um aumento médio na geração de energia de 1,29% e 3,33% para *Gazania rigens* e *Sedum clavatum*, respectivamente, em comparação com o telhado de referência em cascalho.

Figura 5: Configurações das coberturas (FV-Planta): a) FV- *Sedum clavatum*; b) FV- *Gazania rigens*; c) FV-cascalho (referência)

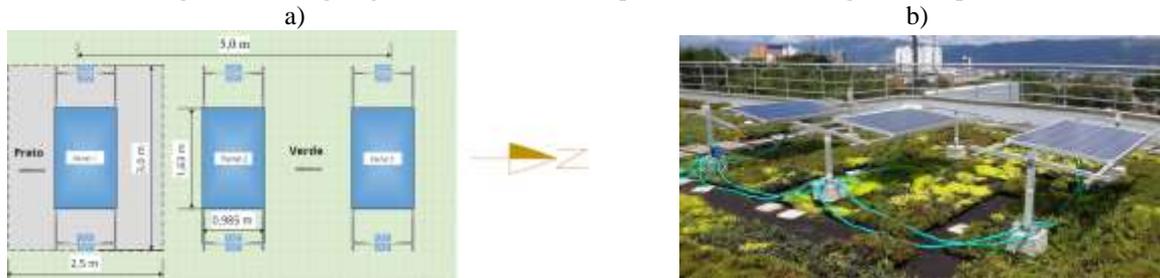


Fonte: Chemisana e Lamnatou (2014)

Os autores realizaram outros testes com vistas a confirmar a eficiência da espécie *Sedum clavatum* no resfriamento do solo. Os resultados comprovaram a redução em torno de 5,95% na temperatura do solo a 3 cm de profundidade, contribuindo para o aumento na produção de energia em torno de 2,24%, em cinco dias. A partir dos experimentos realizados por Chemisana e Lamnatou (2014) foi possível observar como as diferentes espécies de vegetação e as condições climáticas influenciam no desempenho dos sistemas fotovoltaicos, assim como na redução das temperaturas do solo, o que pode ajudar a redução do consumo energético nas edificações, tanto para resfriamento quanto para aquecimento.

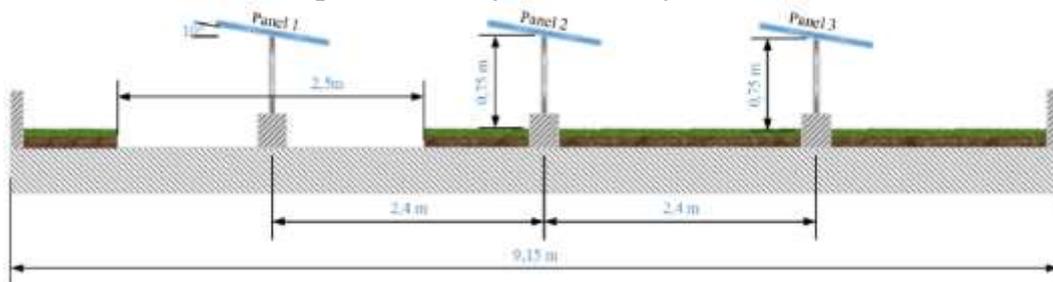
Dois outros artigos selecionados apresentam estudos em climas tropicais. Ambos foram desenvolvidos na Colômbia e avaliam, de forma experimental, configurações com módulos em alturas diferentes, instalados sobre superfície com e sem vegetação. A primeira investigação foi realizada por Osma *et al.* (2016), para a qual foram montados sistemas fotovoltaicos e superfície com vegetação na cobertura do prédio do curso de Engenharia Elétrica, na Universidade Industrial de Santander (Colômbia). O experimento consistiu de três painéis fotovoltaicos, sendo que dois instalados sobre cobertura vegetada removível, para os quais foram utilizadas bandejas, e um telhado preto. O sistema FV foi monitorado por três semanas e considerou os módulos instalados em duas alturas: 0,50m e 0,75m, com inclinação em 10°, orientado a Norte (Figura 6 e 7).

Figura 6: Configurações do sistema FV: a) planta baixa e b) imagem do experimento



Fonte: Osma, *et al.* (2016)

Figura 7: Corte esquemático do experimento.



Fonte: Ordóñez, *et al.* (2016)

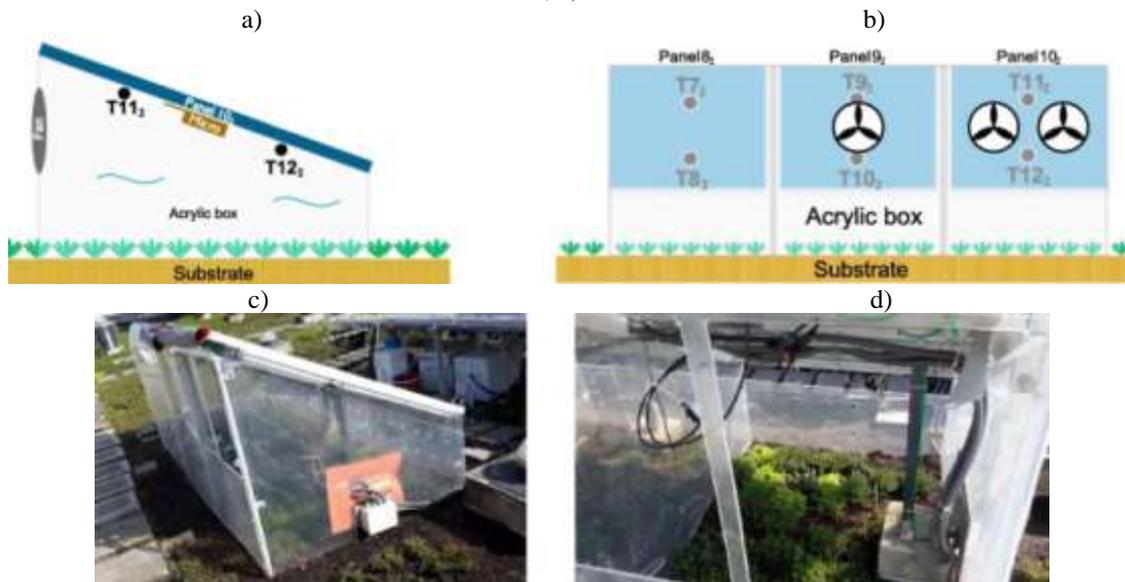
Os resultados obtidos mostraram que a utilização da cobertura verde, por si só, aumenta a geração de energia em torno de 1%. Também foi observado que a altura dos módulos influencia na produção de energia pelo FV. O sistema instalado sobre a cobertura verde na altura de 0,50 m gerou um acréscimo de 2,8% na geração de energia FV. Dessa forma, constatou-se que a superfície sobre a qual os sistemas FV estão instalados exerce influência direta na geração de energia, assim como a altura de instalação dos módulos e o tipo de clima local. Entretanto, são necessárias mais pesquisas na área para se investigar o impacto dos aspectos pontuados nesta pesquisa, considerando o contexto dos climas tropicais quentes, principalmente em localidades com baixas latitudes e localizadas no hemisfério Sul.

Osma-Pinto e Ordóñez-Plata (2019) também realizaram um estudo experimental na Colômbia, na Universidade Industrial de Santander. Os autores buscaram investigar a influência de três fatores: altura de instalação (0,25 m; 0,50 m; 0,75 m e 1,00 m), tipo de cobertura (com vegetação e concreto) e velocidade do ar (0, 1,15 e 2,10 m/s). Para tanto, foram realizados dois experimentos com monitoramento das variáveis elétricas (potência e energia), variáveis ambientais (temperatura do ar, velocidade do ar e irradiação solar) e variáveis térmicas de operação (temperatura de operação do painel fotovoltaico e temperatura do ar circundante). Os tipos de vegetação utilizados nas coberturas vegetadas foram três espécies do gênero *Sedum*, a saber: *Sedum Angelina*, *Sedum blue* e *Sedum sexangulare*. O

critério de escolha baseou-se na característica das folhas grandes e carnudas, que podem armazenar água e resistir a longo período sem irrigação. O desempenho dos sistemas foi baseado na potência de saída e na temperatura operacional dos módulos FV.

Os resultados obtidos possibilitaram constatar que, em climas tropicais quentes, o tipo de telhado influencia significativamente na geração de energia FV, principalmente em baixas alturas. Foi observado, ainda, que uma cobertura verde pode reduzir em torno de 0,3 °C a 0,4°C a temperatura do ar para alturas inferiores a 1m. Os autores destacaram, também, que um sistema de cobertura verde integrado ao FV, pode gerar, em média, entre 1,0 a 1,3% mais energia por dia quando comparado com uma cobertura em concreto aparente a uma altura média de 0,50m acima da cobertura. Assim, os resultados mostraram-se promissores e relevantes para compreensão da temática abordada nesta revisão de literatura. Os experimentos para análise quanto à influência da velocidade do ar foram realizados com uso de ventilação forçada obtida a partir da instalação de ventiladores, considerando três velocidades abaixo dos módulos: 0; 1,15 e 2,10 m/s (Figura 8).

Figura 8: Configurações das coberturas: a) corte esquemático; b) vista esquemática frontal dos ventiladores; c) vista externa da caixa de acrílico; d) vista interna da caixa de acrílico.



Fonte: Osma-Pinto e Ordóñez-Plata (2019)

Os resultados mostraram que velocidades do ar superiores a 1 m/s, podem aumentar a geração média de energia diária em torno de 1,0 a 3,0%, caracterizando-se como um elemento de grande influência no desempenho dos sistemas FV, principalmente para situações com altos valores de irradiação solar ( $>700\text{W/m}^2$ ), porém o mesmo não ocorre para baixas irradiações ( $<300\text{W/m}^2$ ). Contudo, destaca-se ser necessário mais investigação a fim de identificar outros fatores que podem influenciar no desempenho dos sistemas FV, considerando principalmente regiões com climas quentes e úmidos.

## 6 Considerações finais

A partir da análise dos artigos selecionados foi possível identificar pesquisas relevantes que abordaram, de forma integrada, a utilização dos sistemas de cobertura vegetada com sistemas fotovoltaicos. Os trabalhos evidenciaram que as coberturas vegetadas criam microclima mais ameno, principalmente em climas quentes, propiciando a redução da temperatura superficial e do ar das áreas circundantes. Dessa forma, a instalação integrada aos módulos fotovoltaicos pode contribuir para resfriar os painéis, permitindo o funcionamento desse sistema com maior eficiência.

O aumento na eficiência dos sistemas FV foi observado de forma consistente nos artigos analisados. No entanto, o grau do aumento do desempenho variou entre os resultados relatados, de acordo com as condições climáticas locais e os materiais de revestimento das coberturas. Pesquisas futuras podem incorporar outros aspectos ainda pouco abordados nas investigações já realizadas, especialmente em climas tropicais, de forma avaliar a influência das elevadas temperaturas e umidade do ar e a alta incidência de radiação solar direta sobre as superfícies das cobertas ao longo de todo ano sobre o desempenho do sistema FV.

## Referências

- ABDERREZEK, Mahfoud et al. Impact of Installation Substrates on Photovoltaic Modules Energy Yield. In: INTERNATIONAL RENEWABLE AND SUSTAINABLE ENERGY CONFERENCE (IRSEC), 7., 2019, Agadir, Morocco. **Anais [...]**. [S. L.]: Ieee, 2019. p. 1-15.
- ALSHAYEB, Mohammed J.; CHANG, Jae D.. Variations of PV Panel Performance Installed over a Vegetated Roof and a Conventional Black Roof. **Energies**, [S. L.], v. 1110, n. 11, p. 1-14, maio 2018. Doi:10.3390/en11051110.
- BAUMANN, Thomas et al. Photovoltaic systems with vertically mounted bifacial PV modules in combination with green roofs. **Solar Energy**, [S. L.], v. 1, n. 190, p. 139-146, ago. 2019.
- CARTER, Tim; BUTLER, Colleen. Ecological Impacts of Replacing Traditional Roofs with Green Roofs in Two Urban Areas. **Cities And The Environment** (Cate), [S. L.], v. 1, n. 2, p. 1-17, 2008. Digital Commons at Loyola Marymount University and Loyola Law School. Disponível em: <https://digitalcommons.lmu.edu/cate/vol1/iss2/9>. Acesso em: 20 jan. 2021.
- CAVADINI, Giovan Battista; COOK, Lauren M.. Green and cool roof choices integrated into rooftop solar energy modelling. **Applied Energy**, [S.L.], v. 296, p. 117082, ago. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117082>.
- CHEMISANA, D.; LAMNATOU, Chr.. Photovoltaic-green roofs: an experimental evaluation of system performance. **Applied Energy**, [S.L.], v. 119, p. 246-256, abr. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.12.027>.
- HARZMANN, U. German green roofs. In: **Proc. of Annual Green Roof Construction Conference**, Chicago, Illinois. Roofscapes, Inc., 2002.
- KAEWPRAEK, Chila *et al.* The Effect of Plants on the Energy Output of Green Roof Photovoltaic Systems in Tropical Climates. **Sustainability**, [S.L.], v. 13, n. 8, p. 4505, 18 abr. 2021. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/su13084505>.
- LAMNATOU, Chr.; CHEMISANA, D.. A critical analysis of factors affecting photovoltaic-green roof performance. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, [S.L.], v. 43, p. 264-280, mar. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2014.11.048>.
- MOREN, Maria Soledad Penaranda; KORJENIC, Azra. Untersuchungen zum ganzjährigen Wärmeschutz an Varianten eines kombinierten Dachaufbaus mit Photovoltaik und Begrünung. **Bauphysik**, [S. L.], v. 40, n. 3, p. 131-142, jan. 2018. DOI: 10.1002/bapi.201810016.
- MOVAHHEDA, Yasin et al. Simultaneous use of PV system and green roof: a techno-economic study on power generation and energy consumption. In: APPLIED ENERGY SYMPOSIUM AND FORUM, RENEWABLE ENERGY INTEGRATION WITH MINI/MICROGRIDS, 1., 2018, Rhodes, Greece. **Anais [...]**. Rhodes, Greece: Energy Procedia, 2018. p. 478-483.

NAGENGAST, Amy; HENDRICKSONA, Chris; MATTHEWS, H. Scott. Variations in photovoltaic performance due to climate and low-slope roof choice. **Energy And Buildings**, [s. l.], v. 1, n. 64, p. 493-502, maio 2013. [S. L.]. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.05.009>.

OGAILI, Hamid; SAILOR, David J.. Measuring the Effect of Vegetated Roofs on the Performance of Photovoltaic Panels in a Combined System. **Journal Of Solar Energy Engineering**, [S.L.], v. 138, n. 6, p. 0610091-0610098, 3 out. 2016. ASME International. <http://dx.doi.org/10.1115/1.4034743>.

OSMA, G. et al. The impact of height installation on the performance of PV panels integrated into a green roof in tropical conditions. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENERGY PRODUCTION AND MANAGEMENT, 2., 2016, Equador. **Anais [...]**. [S. L.]: Wit Transactions On Ecology And The Environment, 2016. v. 205, p. 147-156.

OSMA-PINTO, German; ORDÓÑEZ-PLATA, Gabriel. Measuring factors influencing performance of rooftop PV panels in warm tropical climates. **Solar Energy**, [S.L.], v. 185, p. 112-123, jun. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2019.04.053>.

RAMSHANI, Mohammad et al. Optimal planning of the joint placement of photovoltaic panels and green roofs under climate change uncertainty. **Omega**, [S. L.], v. 101986, n. 90, p. 1-20, nov. 2018. [Savhttps:// doi.org/10.1016/j.omega.2018.10.016](https://doi.org/10.1016/j.omega.2018.10.016).

RODRIGUES, Caroline. **Novas construções apostam em telhados verdes**. 2017. Disponível em: <<http://www.segs.com.br/demais/48101-novas-construcoes-apostam-em-telhadosverdes.html>>. Acesso em: 08 jan. 2018.

RODRIGUEZ, R. **The History of Green Roof Technology**. 2006. Disponível em: <[http://www.ifenergy.com/50226711/the\\_history\\_of\\_green\\_roof\\_technology.php](http://www.ifenergy.com/50226711/the_history_of_green_roof_technology.php)> Acesso em 10 jun. 2007

RÜTHER, R., 2004. **Edifícios solares fotovoltaicos: o potencial da geração solar fotovoltaica integrada à edificações urbanas e interligada à rede elétrica pública no Brasil**: Florianópolis, Editora FSC/LABSOLAR, 114 p.

SAILOR, David J.; VUPPULURI, Prem. Energy Performance of Sustainable Roofing Systems. In: HEAT TRANSFER SUMMER CONFERENCE, 1., 2013, Estados Unidos da América. **Anais [...]**. [S. L.]: Asme Conference Publications And Proceedings, 2013. p. 1-5.

SANTOS, Ísis Portolan dos. **DESENVOLVIMENTO DE FERRAMENTA DE APOIO À DECISÃO EM PROJETOS DE INTEGRAÇÃO SOLAR FOTOVOLTAICA À ARQUITETURA**. 2013. 278 f. Tese (Doutorado) - Curso de Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013. Disponível em: [http://fotovoltaica.ufsc.br/Teses/Tese\\_Isis\\_Portolan\\_dos\\_Santos.pdf](http://fotovoltaica.ufsc.br/Teses/Tese_Isis_Portolan_dos_Santos.pdf). Acesso em: 01 out. 2020.

SILVA, Wellington Souza; BARBOSA, Ricardo Victor Rodrigues; BATISTA, Juliana Oliveira. Desempenho térmico de sistema de cobertura vegetada na região do semiárido alagoano. **Braz. J. of Develop.**, v.6, p.103449 - 103466, 2020. DOI: 10.34117/bjdv6n12-737.

ZOMER, C. D. *et al.* Edifício de energia zero com gerador fotovoltaico integrado à arquitetura em clima subtropical. CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR, 4; CONFERÊNCIA LATINO-AMERICANA DA ISES, **Anais [...]**. 5., 2012. Disponível em:<[http://www.acquaviva.com.br/CD\\_CBENS/trabalhos/T243.pdf](http://www.acquaviva.com.br/CD_CBENS/trabalhos/T243.pdf)>.Acessoem: 19 out. 2015.