XVIII ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO
XIV ENCONTRO LATINO-AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO
AMBIENTE CONSTRUÍDO E USUÁRIO: PERSPECTIVAS LATINO-AMERICANAS

Desafios arquitetônicos na integração fotovoltaica em edifícios de balanço energético nulo - O caso do LabZero

Desafíos arquitectónicos en la integración fotovoltaica en edificios de energía neta cero - El caso de LabZero

Architectural challenges in photovoltaic integration in zero energy buildings - The case of LabZero

Eficiência energética / *Eficiencia energética / Energy efficiency*

SANTOS, Jason, Graduando, Universidade de Brasília, Brasília - DF, Brasil, jason.ddsantoss@gmail.com

BEZERRA, João Pedro, Graduando, Universidade de Brasília, Brasília - DF, Brasil, 2406joao@gmail.com

BOTELHO, Isabella, Mestranda, Universidade de Brasília, Brasília – DF, Brasil, botelho.isabella@aluno.unb.br

CRONEMBERGER, Joára, Doutora e professora, Universidade de Brasília, Brasília – DF, Brasil, joaracronemberger@unb.br

Resumo

Consideram-se edifícios de balanço energético nulo como um caminho promissor na necessária descarbonização do ambiente construído. A produção de eletricidade neles se dá frequentemente através de sistemas fotovoltaicos, em especial em climas cálidos, devido à alta disponibilidade solar. Com isso, criam-se desafios arquitetônicos de ordem formal, funcional e estrutural. Portanto, o objetivo deste estudo foi elaborar e avaliar alternativas de integração fotovoltaica numa edificação com enfoque no potencial do *Building Integrated Photovoltaics* (BIPV) enquanto elemento de composição arquitetônica. Foram elaborados seis cenários de desenho para as envoltórias, que deveriam atender ao requisito potencial para servir também como atenuadores térmicos. Para avaliação das propostas utilizou-se o método CMT-Tool®, baseado na tríade vitruviana (*utilitas*, *firmitas* e *venustas*). Os resultados indicaram que quatro das propostas foram avaliadas com grau intermediário de sucesso na integração arquitetônica, destacando-se duas, uma positiva e outra negativamente, considerando-se os princípios vitruvianos.

Palavras-chave: BIPV. Avaliação projetual. Transição energética. Processo de projeto.

Resumen

*Los edificios de energía cero se consideran un camino prometedor hacia la necesaria descarbonización del entorno construido. Suelen producir electricidad mediante sistemas fotovoltaicos, especialmente en climas cálidos debido a la alta disponibilidad solar. Esto plantea retos arquitectónicos formales, funcionales y estructurales. Por lo tanto, el objetivo de este estudio fue desarrollar y evaluar alternativas para la integración fotovoltaica en un edificio centrándose en el potencial de Building Integrated Photovoltaics (BIPV) como un elemento de la composición arquitectónica. Se desarrollaron seis escenarios de diseño para las envolventes, que deberían cumplir con el requisito potencial de servir también como atenuadores térmicos. El método CMT-Tool®, basado en la tríada vitruviana (*utilitas, firmitas *y* venustas*), se utilizó para evaluar las propuestas. Los resultados indicaron que cuatro de las propuestas fueron evaluadas con un grado intermedio de éxito en la integración arquitectónica, destacándose dos, una positiva y otra negativa, considerando los principios vitruvianos.*

Palabras clave: BIPV. Evaluación proyectual. Transición energética. Proceso de proyecto.

Abstract

*Zero-energy buildings are seen as a promising path towards the necessary decarbonization of the built environment. They often produce electricity using photovoltaic systems, especially in warm climates due to the high solar availability. This creates formal, functional and structural architectural challenges. The aim of this study is therefore to evaluate photovoltaic integration alternatives in a building focusing on the potential of BIPV as an architectural compositional element. Six design scenarios were drawn up for the envelopes, which should fulfil the potential requirement to also serve as thermal attenuators. The CMT-Tool™ method was used to evaluate the proposals, based on the Vitruvian triad (*Utilitas*, *Firmitas *and* Venustas*). The results indicated that four of the proposals were evaluated with an intermediate degree of success in architectural integration, with two standing out, one positive and one negative, considering the Vitruvian principles.*

Keywords: BIPV. Design assessment. Energy transition. Design process.

Introdução

No Brasil, tradicionalmente, os módulos fotovoltaicos vêm sendo utilizados de forma aplicada sobre a envoltória das edificações, considerando como fator determinante para as decisões de projeto a otimização da produção energética. Tal abordagem, no entanto, pode resultar em conflitos com a arquitetura, especialmente do ponto de vista funcional (utilização do espaço) e formal, podendo levar a decisões de partido que sacrifiquem estes dois aspectos em função da geração de energia. Com o crescimento da demanda por energia, em conjunto com a necessidade premente de descarbonização da matriz energética (Kuhn et al., 2020), há uma tendência crescente de utilização da tecnologia fotovoltaica, tendo em vista que é um dos principais recursos para produção de energia limpa. Assim, a reflexão sobre o impacto das instalações fotovoltaicas na paisagem também tem ganhado importância (Dias; Schmid, 2024). Ao mesmo tempo, com a população urbana em crescimento, com previsão de que alcance 68% da população global até 2050 (ONU-Habitat, 2022), a demanda por edificações urbanas também aumenta, o que traz uma oportunidade para o crescimento da aplicação da tecnologia BIPV (*Building Integrated Photovoltaics*) (Constantinou et al., 2023) aproveitando sua envoltória. Skandalos *et al*. (2022) apontam, no entanto, que um dos desafios para uma integração adequada da tecnologia de geração de energia a partir do sol é a dificuldade em se avaliar a qualidade da integração arquitetônica.

Segundo Vassiliades *et al*. (2022), a maioria dos estudos sobre geração de energia solar em edifícios se concentra em questões referentes ao desempenho energético. Nesse cenário, ainda há muito espaço para investigação e debate acerca das componentes arquitetônicas em projetos de integração fotovoltaica. Considera-se como integrado à edificação um módulo fotovoltaico que tenha sido projetado de modo a compor ou substituir algum elemento construtivo (Kuhn *et al.*, 2020), sendo que sua remoção implica em necessária substituição por outro elemento construtivo.

Krstić-Furundžic *et. al.* (2020) salientam que as cidades, como um dos maiores consumidores de energia, precisam liderar a transição para a produção energética a partir de fontes renováveis, tendo a tecnologia fotovoltaica papel de destaque nesse processo. Nesse cenário, a geração distribuída de energia, utilizando as superfícies das próprias edificações urbanas, marquises e proteções solares, mobiliário urbano e até de veículos do transporte público, é uma estratégia adaptativa inteligente e que pode ser aplicada em matrizes urbanas tanto novas quanto já existentes. Os autores apontam, no entanto, que o ambiente urbano, ainda

que de grande potencial, também apresenta desafios significativos, que precisam ser objeto de pesquisas futuras para uma abordagem bem-sucedida, como o sombreamento das superfícies das edificações em bairros densos e geometrias complexas.

Já Skandalos *et al.* (2022), ao estudar a adaptabilidade local de sistemas BIPV, de acordo com as diferentes condições climáticas classificadas na escala de Köppen-Geiger, concluíram que, para a região climática em que Brasília está localizada, onde os valores de Irradiação Horizontal Global (GHI) são altos, dispositivos fotovoltaicos semitransparentes de sombreamento (STPV) foram particularmente eficazes, colaborando na compensação dos gastos necessários para resfriamento. Apontam ainda que, com o uso adicional de telhados fotovoltaicos e ventilação adequada, um balanço energético nulo é viável.

Nesse contexto, o objetivo deste trabalho foi elaborar e avaliar alternativas de integração fotovoltaica numa edificação de balanço energético nulo real, com enfoque no potencial do BIPV enquanto elemento de composição arquitetônica.

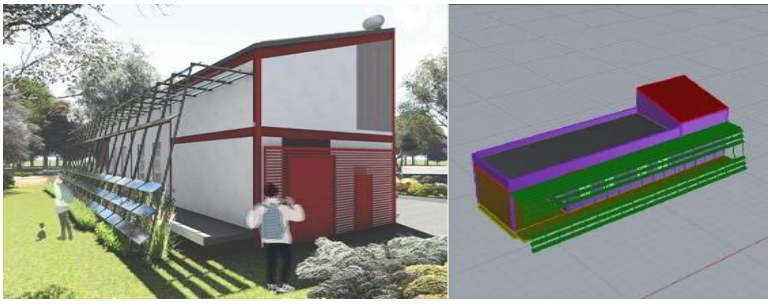
Método

A fim de alcançar o objetivo proposto, o presente estudo seguiu três etapas: levantamento de produtos disponíveis nos mercados nacional e internacional; elaboração de propostas de integração fotovoltaica (BIPV) e avaliação utilizando a CMT-Tool®.

O estudo de caso

A edificação adotada para o estudo de caso, o LabZero (Figura 1), será um edifício de balanço energético nulo, ora em construção no campus Darcy Ribeiro da Universidade de Brasília, e que terá como objetivo, além de servir de espaço para pesquisa em estratégias de eficiência energética na arquitetura, a divulgação para a comunidade a respeito dos avanços científicos na área, sendo planejada a visitação aberta ao público externo. Sua construção é fruto da chamada pública Procel Edifica de 2019, que teve como objetivo apoiar o projeto e a construção de edificações NZEB pelo país e estimular sua divulgação visando à adoção dessa abordagem energética em larga escala (AMORIM *et al*, 2021).

Figura 1: LabZero - UnB



Fonte: Laboratório de Controle Ambiental e Eficiência Energética - FAU/UnB, 2023.

No projeto original, os módulos fotovoltaicos foram utilizados como brises e guarda-corpo, como pode-se observar na imagem acima (destacados em verde).

Brasília se encontra no bioma Cerrado, e possui duas estações bem definidas. Um verão quente e chuvoso de outubro a março e um inverno seco de abril a setembro. Esse cenário de cerca de metade do ano sem chuva acaba contribuindo para que a cidade tenha um dos maiores índices de irradiação global horizontal (GHI) dentre as capitais brasileiras (Pereira *et al.*, 2017), favorecendo o uso da tecnologia solar fotovoltaica.

Etapa 1: Levantamento de produtos disponíveis nos mercados nacional e internacional

A fim de avaliar as possibilidades arquitetônicas de integração fotovoltaica, foi realizada pesquisa de fornecedores e modelos disponíveis nacional e internacionalmente, a partir de pesquisas nas páginas web de fornecedores. Visto que nesse momento as possibilidades de aplicação dos módulos ainda estavam em aberto, foram pesquisados elementos tanto de fachada (paredes, janelas e brises) quanto de cobertura. Também foram pesquisados módulos convencionais com dimensões que pudessem atender às necessidades do projeto.

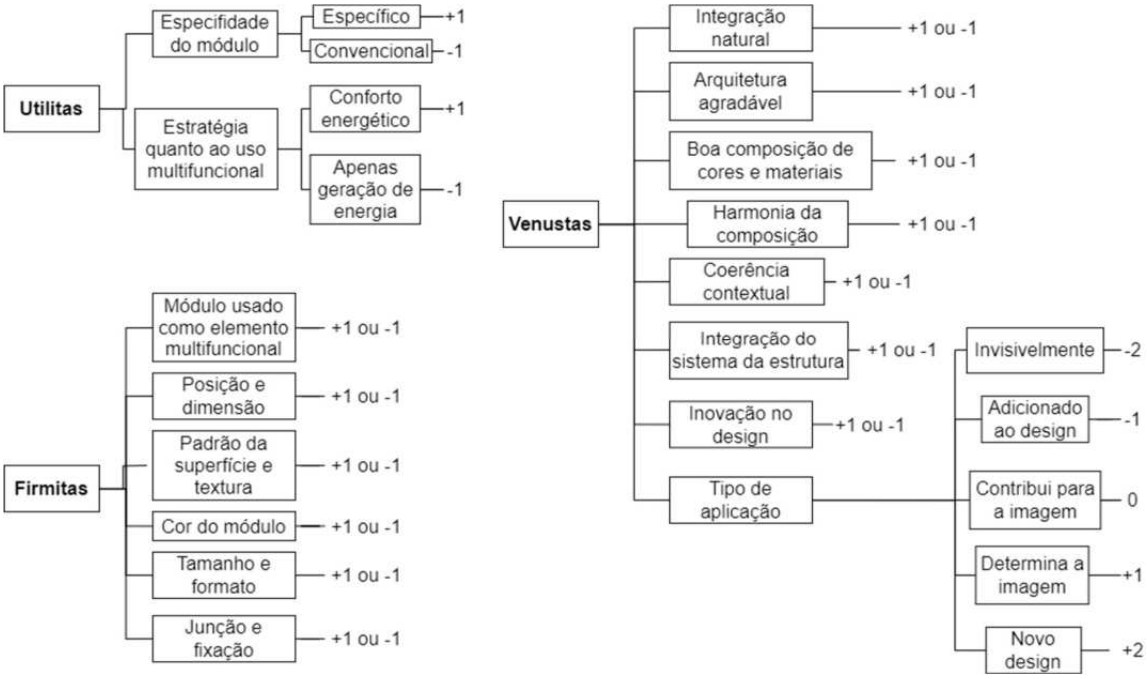
Etapa 2: Elaboração de propostas de integração fotovoltaica (BIPV)

A elaboração das propostas alternativas para a integração fotovoltaica na envoltória do edifício partiu de uma análise do contexto local, considerando as condições ambientais como orientação solar predominante e possibilidades de sombreamentos, bem como as características morfológicas, construtivas e funcionais da edificação e do entorno imediato.

Etapa 3: Avaliação utilizando a CMT-Tool®

Para realizar a avaliação da integração foi utilizado o método CMT-Tool® (Tanabe, 2022). Trata-se de uma ferramenta de análise de projetos, produtos ou sistemas, que toma como referência a Tríade Vitruviana, com critérios para estabelecer uma avaliação equilibrada da integração em função dos três princípios tradicionais estabelecidos pelo célebre arquiteto romano: funcionalidade (*utilitas*), firmeza estrutural (*firmitas*) e beleza (*venustas*) (Figura 2).

Figura 2: CMT-Tool® - princípios e parâmetros.



Fonte: Adaptado de Tanabe (2022).

Para cada um dos parâmetros avaliados, atribui-se uma nota positiva (+1) para a coerência e negativa (-1) para a incoerência, com exceção do critério “tipo de aplicação”, no qual a avaliação é graduada em cinco níveis, variando de -2, para “invisivelmente”, a +2, para “novo design”. Após a atribuição das pontuações, soma-se os totais obtidos para enquadrar o projeto avaliado em uma das três categorias de desempenho, A, B ou C, em relação a cada princípio vitruviano (Tabela 1).

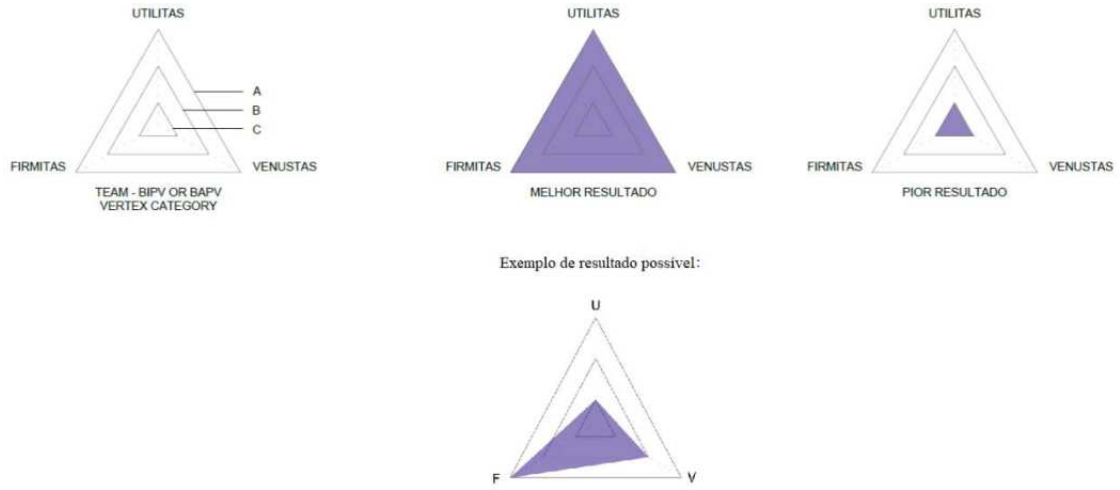
Tabela 1: Classificação de acordo com as pontuações.

Utilitas		Firmitas		Venustas	
Pontuação	**Categoria**	**Pontuação**	**Categoria**	**Pontuação**	**Categoria**
2	A	3 ≤ X ≤ 6	A	3 ≤ X ≤ 8	A
0	B	-2 ≤ X ≤ 2	B	-2 ≤ X ≤ 2	B
-2	C	-6 ≤ X ≤ -3	C	-8 ≤ X ≤ -3	C

Fonte: Adaptado de Tanabe (2022).

Elabora-se uma representação gráfica do enquadramento do projeto avaliado em cada um dos três eixos estabelecidos (Figura 3).

Figura 3: Estrutura dos triângulos de avaliação e exemplo de preenchimento.



Fonte: Adaptado de Bezerra (2023).

Resultados e discussão

A partir do levantamento dos produtos existentes no mercado, constatou-se que os modelos internacionais apresentam ampla gama de possibilidades formais, no que se refere a cores, formatos e aplicações. O intuito em pesquisá-los foi a formação de repertório acerca das diferentes formas de integração possíveis, com o objetivo de alimentar o processo criativo de elaboração das propostas, a ser realizado em etapa subsequente. Quanto aos modelos disponíveis nacionalmente, verificou-se a quase inexistência de modelos BIPV dedicados no mercado brasileiro. Dessa forma, o levantamento buscou investigar a viabilidade de aplicação prática das soluções propostas, considerando as limitações tecnológicas e comerciais do

contexto nacional. Na Tabela 2 encontram-se informações quanto aos modelos identificados, maiores detalhes podem ser verificados em Bezerra (2024).

Tabela 2: Fabricantes e produtos identificados.

Fabricante	Nº de modelos	Tecnologia	Intervalo de comprimento (mm)	Intervalo de altura (mm)	Intervalo de eficiência (%)	Intervalo de potência nominal (Wp)
Fab. internacional 1	11	9 monocristalinos; 3TOPCon Cells	1722 - 2384	1048 - 1303	21,10 - 22,40	435 - 695
Fab. internacional 2	13	13 monocristalinos	1903 - 2278	1002 - 1134	20,13 - 22,65	405 - 585
Fab. internacional 3	7	7 monocristalinos	2015 - 2465	996 - 1134	20,40 - 22,50	410 - 615
Fab. nacional 1	5	5 monocristalinos	2278 - 2384	1134 - 1303	21,30 - 22,50	550 - 700
Fab.nacional 2	4	4 monocristalinos	1956 - 2384	992 - 1303	17,00 - 22,50	330 - 700
Total	**40**	**Sendo 37 monocristalinos e 3 TOPCon Cells**				
			Comprimento (mm)	Altura (mm)	Eficiência (%)	Potência nominal (Wp)
Média de todos os modelos			**2204**	**1140**	**21**	**540**

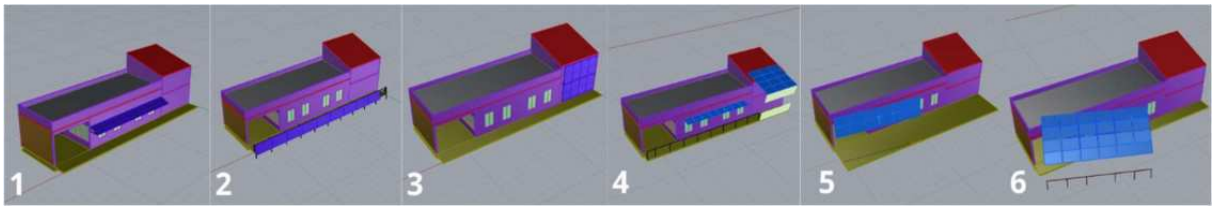
Fonte: Autores (2024).

Após a fase de levantamento de produtos, decidiu-se que o módulo a ser utilizado como referência seria um modelo convencional *off-the-shelf*, de medidas 2384 mm x 1303 mm x 35 mm, tecnologia de silício monocristalino e 20% de eficiência de conversão. Essa decisão se baseia na alta disponibilidade do componente no mercado, e à dificuldade de obter módulos BIPV dedicados no mercado brasileiro, como mencionado. Assim, buscou-se utilizar o módulo fotovoltaico de forma multifuncional, cumprindo, para além da geração de energia, os papéis de sombreamento de aberturas e fachada, de definição de ambientes e de proteção, como guarda-corpo. Dessa forma, o equipamento, ainda que convencional, foi adicionado à arquitetura de modo a incorporar novas qualidades ao edifício, que seriam prejudicadas ou inexistentes sem seu uso, atendendo, assim, ao conceito de fotovoltaica integrada à edificação (Kuhn *et al*., 2020).

Para a integração arquitetônica dos módulos fotovoltaicos no edifício LabZero, foram concebidas seis propostas alternativas àquela desenvolvida no projeto original. No processo de projeto, um dos principais critérios de desenho foi garantir que os módulos fossem aplicados de maneira multifuncional, a fim de reforçar seu potencial enquanto elementos arquitetônicos, para além da função de produção energética.

Foram elaboradas e modeladas tridimensionalmente, utilizando a ferramenta digital Rhinoceros, seis propostas de integração fotovoltaica (Figura 4), que se dividem em três tipos diferentes de abordagens. Quatro trabalham os módulos fotovoltaicos como dispositivos de sombreamento (1, 4, 5 e 6), uma como guarda-corpo (2) e uma como fachada dupla ventilada (3). Ressalta-se, ainda, que as alternativas 5 e 6, além das funções de sombreamento e geração de energia, buscaram delimitar um espaço de permanência ao ar livre contíguo ao edifício existente.

Figura 4: Alternativas de integração fotovoltaica para o LabZero.



Fonte: Autores (2024).

Avaliou-se a integração proposta nas alternativas por meio da análise do atendimento a cada parâmetro estabelecido pelo método CMT-Tool® (conforme parâmetros apresentados anteriormente na Figura 2). Esta etapa apresentou os resultados demonstrados na Tabela 3.

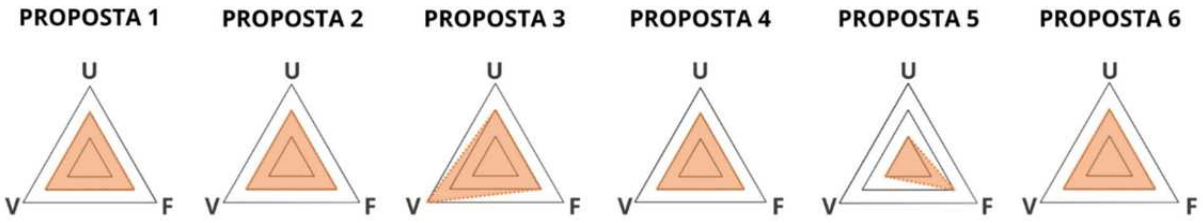
Tabela 3: Resultados da avaliação a partir da CMT-Tool®.

Proposta	Utilitas		Firmitas		Venustas	
	Pontuação	Categoria	Pontuação	Categoria	Pontuação	Categoria
1	0	B	2	B	2	B
2	0	B	2	B	2	B
3	0	B	2	B	3	A
4	0	B	2	B	2	B
5	-2	C	2	B	1	C
6	0	B	2	B	2	B

Fonte: Autores (2024).

A partir desses resultados, foram geradas as representações gráficas para cada alternativa de integração. Assim, pôde-se reunir os gráficos correspondentes a cada proposta, possibilitando uma comparação ágil e intuitiva dos resultados alcançados (Figura 5).

Figura 5 – Diagramas dos resultados da avaliação da integração arquitetônica - CMT - Tool®.



Sendo, U = *Utilitas*, V = *Venustas* e F = *Firmitas*

Fonte: Autores (2024).

Os resultados evidenciam que a maioria das propostas foi avaliada com diferentes graus de sucesso na integração arquitetônica considerando os três princípios vitruvianos de referência. A alternativa que consiste na aplicação da tecnologia fotovoltaica em fachada ventilada (3) alcançou os melhores resultados. Já a alternativa 5, que propunha um sombreamento das janelas juntamente com a criação de um espaço de convivência, apresentou o pior desempenho.

Neste caso, entende-se que tal resultado se deu em virtude de que seria necessário um maior refinamento da solução para atender adequadamente aos requisitos de sombreamento das aberturas, bem como a definição adequada da estrutura de suporte, aspectos que não foram plenamente resolvidos no estudo preliminar.

Já a fachada ventilada (alternativa 3), além de oferecer ganhos funcionais importantes, contribuindo para a diminuição da carga térmica do edifício, adicionou valor formal a uma das fachadas de destaque da edificação, que, sem as proteções solares, consistiria numa empena cega, pouco expressiva. Ao contrário, com a aplicação dos módulos solares, aquela fachada, que possui destaque na volumetria, passaria a ser uma vitrine de divulgação para o público visitante de uma estratégia importante para o alcance do balanço energético nulo da edificação, contribuindo, assim, para a missão do LabZero enquanto espaço de divulgação científica.

Os resultados são coerentes com a literatura científica consultada, como indicam Custódio *et al.* (2022), que apontam a qualidade da integração arquitetônica como sendo “o resultado da

integração fotovoltaica coerente do edifício, que considera aspectos construtivos, funcionais e estéticos (formais)". Os autores apontam ainda que o desempenho energético de módulos fotovoltaicos instalados no telhado foi maior do que nas alternativas em que foram utilizados como dispositivos de sombreamento. No entanto, os valores foram próximos, demonstrando a viabilidade do uso de sistemas BIPV em fachadas em baixas latitudes, como é o caso do LabZero. Kuhn *et al.* (2021) já afirmavam como um dos passos importantes para o futuro do BIPV o crescimento da quantidade de projetos de demonstração da aplicação da tecnologia no ambiente construído.

Conclusões

Este estudo avaliou diferentes configurações de integração fotovoltaica, utilizando o método CMT-Tool®, num edifício de balanço energético nulo a ser construído na Universidade de Brasília. No que se refere à etapa 1, verificou-se que praticamente não existem modelos BIPV disponíveis no mercado nacional, o que tende a prejudicar a adoção da integração fotovoltaica em projetos a serem realizados no país e que poderiam se valer da geração distribuída de energia como estratégia de eficiência energética e conforto ambiental, sendo necessário mais investimento no desenvolvimento dessa indústria. Quanto à etapa 2, foram desenvolvidas seis propostas alternativas de integração fotovoltaica no edifício LabZero, cuja qualidade foi avaliada na etapa 3, utilizando-se o método CMT-Tool®. Por fim, na etapa 3, a maioria das propostas alcançou grau intermediário de sucesso na integração arquitetônica considerando os três princípios vitruvianos de referência. Destacaram-se as alternativas 3, que obteve grau superior de avaliação no critério formal (*venustas*) e a alternativa 5, que recebeu avaliação inferior em relação aos critérios de funcionalidade (*utilitas*) e forma (*venustas*).

Com este exercício, constatou-se que a ferramenta possui bastante valor no processo de projeto, se for utilizada de forma iterativa, a fim de refinar as decisões projetuais. Sua simplicidade, abrangência e agilidade favorecem o uso recorrente durante o processo de projeto para a verificação da qualidade da integração ao mesmo tempo em que se busca o equilíbrio entre os princípios da tríade vitruviana para uma boa arquitetura.

Como limitações do estudo é importante ressaltar que, quanto à avaliação dos aspectos estéticos, sempre há uma carga de subjetividade inerente, bem como um viés na análise das propostas, considerando que o autor da avaliação participou também do processo de elaboração delas.

Como possiblidades futuras de pesquisa, sugere-se uma maior investigação quanto a possibilidades de diferentes composições de geometrias, cores e níveis de transparência das células fotovoltaicas, bem como uma exploração em maior detalhe das questões construtivas para a implementação de projetos fotovoltaicos.

Referências

AMORIM, Claudia Naves David *et al*. Da pesquisa ao projeto: edifício de balanço energético nulo - o caso do LabZero|UnB. **Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído**, v. 16, p. 1351-1360, 2021.

Bezerra, J. P. M. "Avaliação dos sistemas solares utilizados nos protótipos Solar Decathlon Europe através da nova ferramenta CMT-Tool". In: **28° Congresso de Iniciação Científica da UnB e 19° Congresso de Iniciação Científica do DF.** Anais. Brasília, 2023.

Bezerra, J. P. M. "Impacto térmico de envoltórias solares em edifícios de balanço energético nulo – o caso do LabZero - UnB". In: **30° Congresso de Iniciação Científica da UnB e 21° Congresso de Iniciação Científica do DF.** Anais (no prelo). Brasília, 2024.

Constantinou, S. *et al*. "A review on technological and urban sustainability perspectives of advanced building-integrated photovoltaics". **Energy Science & Engineering**. Londres: Society of Chemical Industry and John Wiley & Sons Ltd., 4 dez. 2023.

Custódio, I. *et al*. "A holistic approach for assessing architectural integration quality of solar photovoltaic rooftops and shading devices". **Solar Energy**. Falls Church: International Solar Energy Society, Vol. 237, mai. 2022, 432–446.

Dias, S.; Schmid, A. **Edifícios fotovoltaicos:** energia na gênese arquitetônica. Curitiba: Editora Insight, pp. 1-474, mar. 2024, pp. 1-336.

Krstić-Furundžić A. *et al*. "Trends in the integration of photovoltaic facilities into the built environment". **Open House International**. Leeds: Emerald Publishing Limited, Vol. 45, N. 1/2, jun. 2020, 195–207.

Kuhn, T. E. *et al*. Review of Technological Design Options for Building Integrated Photovoltaics (BIPV). **Energy and Buildings**. Amsterdam: Elsevier B.V., Vol. 231, jan. 2021, p. 110381.

Pereira, E. B. *et al*. **Atlas brasileiro de energia solar.** São José dos Campos: INPE, 2017. pp. 1-80.

Skandalos, N. *et al*. Building PV integration according to regional climate conditions: BIPV regional adaptability extending Köppen-Geiger climate classification against urban and climate-related temperature increases. **Renewable and Sustainable Energy Reviews.** Amsterdam: Elsevier, Vol. 169, nov. 2022, p. 112950.

Tanabe, C. T. Estratégias de integração arquitetônica de sistemas solares em edificações – proposta de metodologia de avaliação (CMT-Tool®), In: **28º Congresso de Iniciação Científica da UnB e 19º Congresso de Iniciação Científica do DF**. Anais. Brasília, 2022.

United Nations Human Settlements Programme (UN-Habitat). **World Cities Report 2022**. Nairóbi, Quênia. 2022. https://unhabitat.org/sites/default/files/2022/06/wcr_2022.pdf, consultado em 01/12/2024.

Vassiliades, C. *et al*. Building integration of active solar energy systems: A review of geometrical and architectural characteristics. **Renewable and Sustainable Energy Reviews.** Amsterdam: Elsevier, Vol. 164, mai. 2022, p. 112482.