XXI ENTAC – Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído
14 a 16 de outubro de 2026 | Goiânia-Brasil
DOI: https://doi.org/10.46421/entac.v21i1.8482

Desempenho energético de fachadas com geração híbrida fotovoltaica e eólica: revisão de literatura

Energy Performance of Facades with Hybrid Photovoltaic and Wind Generation: a literature review

Monja da Conceição Kistner
Universidade Federal da Bahia | Salvador | Brasil | E-mail monjakistner@ufba.br
Andrea Verri Bastian
Universidade Federal da Bahia | Salvador | Brasil | E-mail andrea.bastian@ufba.br

Resumo

Este artigo apresenta uma revisão integrativa da literatura sobre sistemas de fachadas com integração de energias renováveis, com ênfase em soluções fotovoltaicas e eólicas de pequena escala. O objetivo é analisar o estado da arte, identificar lacunas e indicar direções para o desenvolvimento de modelos multifísicos. A metodologia baseia-se em buscas estruturadas em bases de dados científicas, com critérios de inclusão e exclusão. Os resultados indicam predominância de estudos sobre BIPV, enquanto a integração eólica permanece pouco explorada, especialmente em climas tropicais, evidenciando a necessidade de abordagens integradas que considerem a complexidade microclimática urbana. Destaca-se o aumento das exigências normativas quanto à integração funcional, segurança e desempenho, bem como a necessidade de alinhamento dos sistemas às dimensões ambientais e sociais, reforçando a importância do avanço de modelos multifísicos.

Palavras-chave: Fachadas com geração híbrida. Sistemas fotovoltaicos integrados à edificação (BIPV). Energia eólica urbana. Desempenho energético. Modelagem multifísica.

Abstract

This article presents an integrative review of the literature on facade systems incorporating renewable energy, with an emphasis on photovoltaic solutions and small-scale wind power. The objective is to analyze the state of the art, identify gaps, and suggest directions for the development of multiphysical models. The methodology is based on structured searches of scientific databases, using inclusion and exclusion criteria. The results indicate a predominance of studies on BIPV, while wind integration remains largely unexplored, especially in tropical climates, highlighting the need for integrated approaches that account for urban microclimatic complexity. Noteworthy is the increase in regulatory requirements regarding functional integration, safety, and performance, as well as the need to align systems with environmental and social dimensions, reinforcing the importance of advancing multiphysical models.

Keywords: Hybrid-powered facades. Building-integrated photovoltaics (BIPV). Urban wind energy. Energy performance. Multiphysics modeling.

Como citar:
KISTNER, M. C.; BASTIAN, A. V. Desempenho energético de fachadas com geração híbrida fotovoltaica e eólica: revisão de literatura. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 21, 2026, Goiânia. **Anais**... Goiânia: ANTAC, 2026.

DOI: https://doi.org/10.46421/entac.v21i1.8482

INTRODUÇÃO

A crescente demanda por energia no setor da construção civil, aliada aos impactos ambientais associados ao uso de fontes fósseis, tem impulsionado a incorporação de estratégias de eficiência energética e de geração renovável em edificações. Nesse cenário, a envoltória dos edifícios, especialmente as fachadas, passa a desempenhar um papel estratégico, não apenas como elemento de proteção e mediação ambiental, mas também como superfície ativa para a produção de energia.

Entre as estratégias de descarbonização urbana, os sistemas fotovoltaicos integrados à edificação (*Building-Integrated Photovoltaics* - BIPV) destacam-se por possibilitarem a geração descentralizada diretamente na envoltória. Ao substituir componentes construtivos tradicionais, esses sistemas apresentam caráter multifuncional, provendo não apenas integração estética, mas também proteção contra ruído e intempéries, isolamento térmico e privacidade [1].

Paralelamente, a energia eólica de pequena escala apresenta um potencial complementar estratégico para o ambiente urbano, onde o espaço para turbinas tradicionais é escasso. No entanto, sua aplicação na envoltória ainda é restrita, com predominância de estudos sobre turbinas integradas (*Building Integrated Wind Turbines* – BIWT e *Building Augmented Wind Turbine* - BAWT), frequentemente tratadas como dispositivos instalados ao edifício. As abordagens que concebem a pele do edifício como um sistema ativo gerador de energia eólica, conforme definido pelo conceito de Wind-Powered Building Skins (WPBS), permanecem pouco consolidadas [2].

Diante disso, sistemas híbridos que integram energia solar e eólica configuram-se como uma alternativa promissora, ao explorar a complementaridade entre essas fontes e ampliar a estabilidade da geração energética. Assim, este artigo tem como objetivo analisar o desempenho energético de fachadas com geração híbrida fotovoltaica e eólica, identificando estratégias, limitações e potencialidades de aplicação, com ênfase em contextos urbanos de clima tropical.

ASPECTOS METODOLÓGICOS

A pesquisa fundamenta-se em uma Revisão Integrativa (RI), estratégia metodológica mais ampla entre as revisões de literatura, pois permite a inclusão simultânea de estudos com delineamentos diversos. Diferente de revisões narrativas, a RI segue um processo estruturado em seis etapas: elaboração da pergunta norteadora, busca na literatura, coleta de dados, análise crítica, discussão dos resultados e síntese do conhecimento [3].

O protocolo de pesquisa foi delineado para responder às seguintes questões:

1. Qual a eficácia de fachadas modulares híbridas no desempenho energético e conforto térmico em contextos urbanos tropicais?
2. Quais são as principais limitações técnicas para a aplicação de microturbinas eólicas e células fotovoltaicas em fachadas?

3. Como a modelagem paramétrica e a simulação computacional contribuem para a validação do desempenho de fachadas modulares?

Realizaram-se buscas nas bases de dados Science Direct e Scopus em fevereiro de 2026, utilizando operadores booleanos e descritores em inglês (ex: "photovoltaic generation AND facade design AND wind energy"), que combinaram termos sobre envoltória da edificação, tecnologias de microgeração e variáveis de contexto e desempenho. Essa abordagem possibilitou a identificação de estudos que integram essas tecnologias à envoltória da edificação e à análise do desempenho energético das edificações, ampliando o alcance internacional da pesquisa.

A busca inicial resultou em um total de 309 artigos. Os metadados (título, resumo e palavras-chave) foram importados para a plataforma Parsifal, na qual foram aplicados critérios de inclusão e exclusão, conforme apresentado no Quadro 1.

Quadro 1: Critérios de inclusão e exclusão de estudos

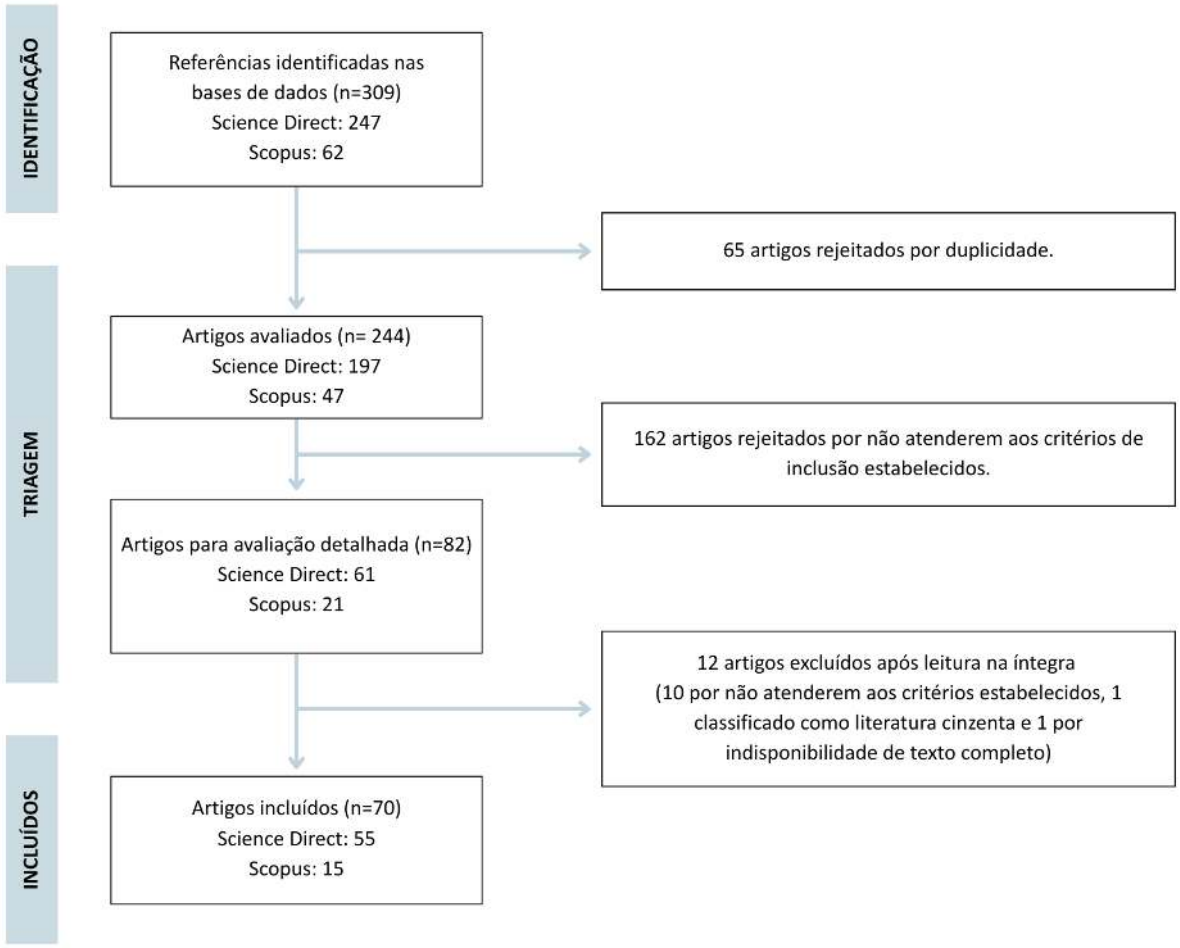
Critérios de Inclusão	Publicações recentes, no período de 2016 a 2026
	Artigos revisados por pares
	Artigos publicados nos idiomas inglês, português ou espanhol
Critérios de Exclusão	Artigos sem acesso ao texto completo
	Literatura cinzenta, incluindo capítulos de livros, teses, dissertações, anais de conferências, relatórios técnicos e documentos não revisados por pares
	Resumos expandidos
	Estudos que não abordam a integração de sistemas energéticos em fachadas de edifícios

Fonte: as autoras.

Após a etapa de triagem, ilustrada na Figura 1, procedeu-se à seleção final dos estudos a serem analisados.

DOI: https://doi.org/10.46421/entac.v21i1.8482

Figura 1: Fluxo do processo de seleção dos estudos



Fonte: as autoras.

Na sequência, foram extraídos dados relevantes dos artigos selecionados, incluindo objetivos, métodos empregados, principais resultados, ano de publicação, lacunas de pesquisa e desafios identificados. Esse processo permitiu a sistematização do conhecimento existente, bem como a identificação de tendências, limitações e oportunidades relacionadas à integração de sistemas eólicos e fotovoltaicos em edificações.

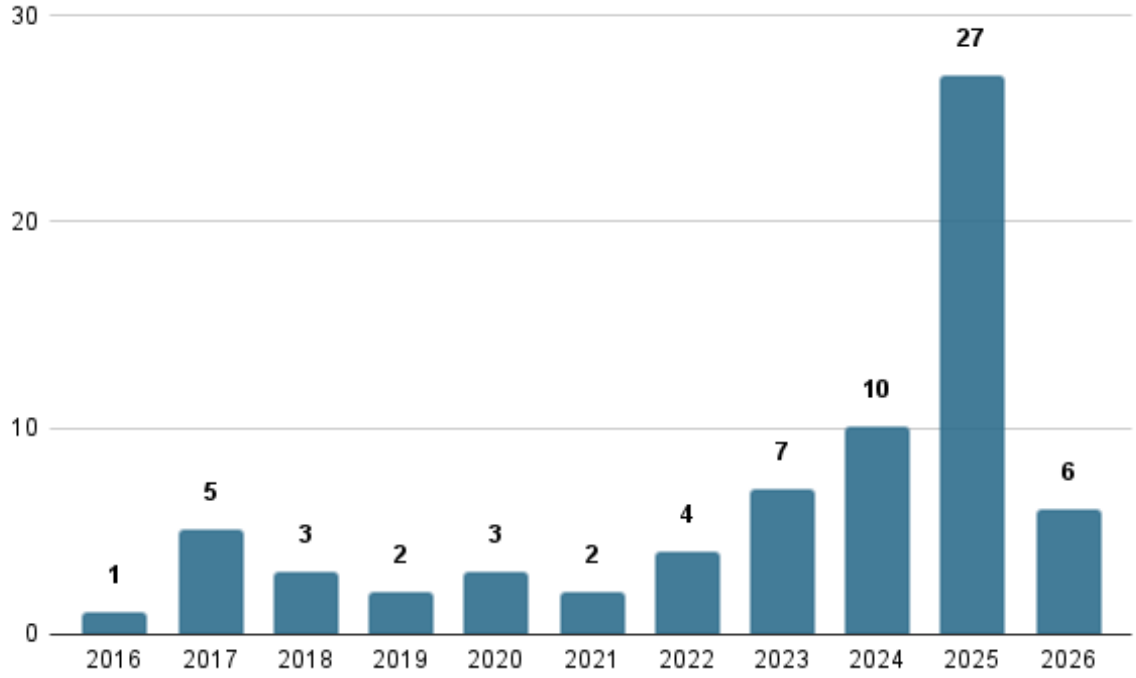
DISCUSSÃO DE RESULTADOS

A análise dos estudos selecionados foi estruturada a partir de categorias analíticas definidas com base nos objetivos da revisão, buscando evidenciar padrões de publicação, abordagens temáticas e lacunas recorrentes na literatura. Nesse contexto, inicialmente são apresentadas as características gerais dos artigos, permitindo compreender a distribuição temporal das pesquisas e o foco predominante das investigações na área.

CARACTERÍSTICAS DOS ARTIGOS

De forma geral, a análise dos estudos selecionados evidencia concentração recente das publicações, com maior incidência a partir de 2023 (Figura 2).

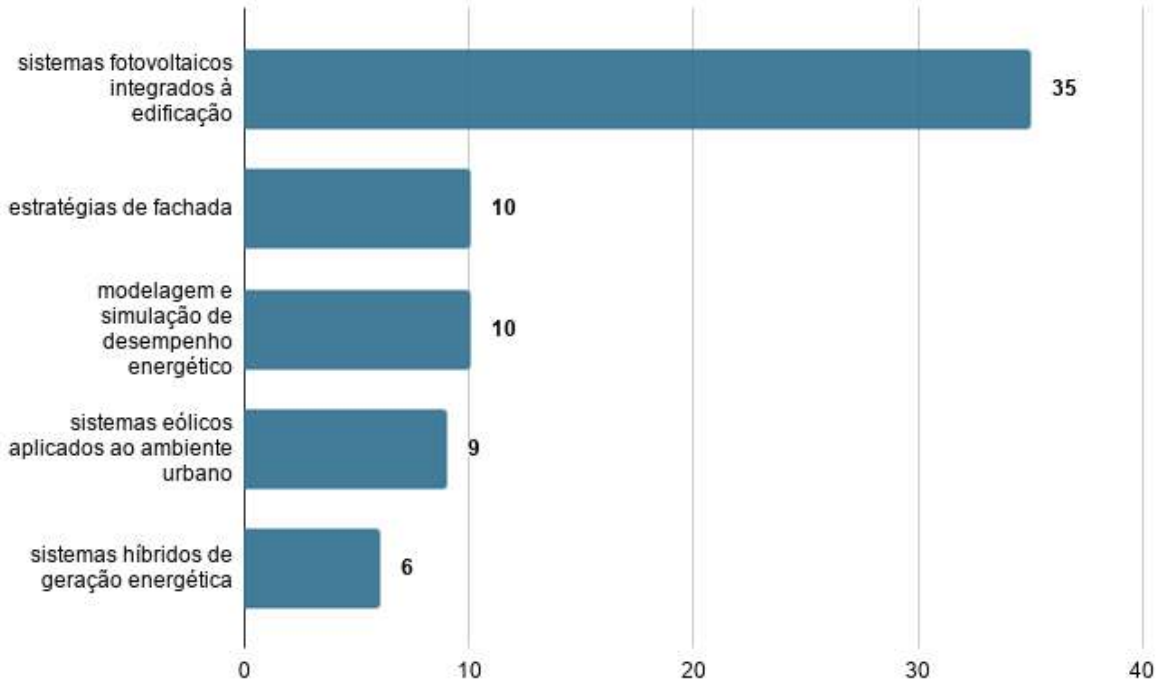
Figura 2: Período de publicação dos artigos selecionados para a revisão



Fonte: as autoras.

Quanto à temática (Figura 3), predominam pesquisas sobre sistemas fotovoltaicos integrados à edificação, enquanto estudos sobre sistemas eólicos urbanos e soluções híbridas são menos frequentes, evidenciando assimetria na literatura e predominância de investigações voltadas à energia solar em detrimento de outras tecnologias de aproveitamento energético em edificações.

Figura 3: Classificação temática dos artigos selecionados



Fonte: as autoras.

CONDICIONANTES DA INTEGRAÇÃO HÍBRIDA EM EDIFICAÇÕES

A integração energética híbrida em edificações é condicionada por fatores que envolvem lacunas do estado da arte e desafios de aplicação no contexto urbano. A literatura evidencia que a maior parte dos estudos sobre sistemas híbridos fotovoltaico-eólicos concentra-se em aplicações de grande escala voltadas ao fornecimento de eletricidade para comunidades, sendo limitado o número de pesquisas direcionadas à escala do edifício [4]. Além disso, as metodologias de avaliação de edifícios de energia quase zero (*Nearly Zero Energy Buildings* - NZEB) são predominantemente baseadas em climas temperados, não contemplando adequadamente contextos tropicais, nos quais a demanda energética é fortemente condicionada pelo resfriamento e pela alta umidade [5].

Apesar dos avanços nas pesquisas sobre envoltórias ativas voltadas à melhoria do desempenho energético dos edifícios, a literatura ainda se concentra na conversão da energia solar [6]. Esse foco evidencia lacunas significativas, sobretudo no que se refere à limitada atenção dedicada aos impactos dos sistemas BIPV no interior das edificações, especialmente em áreas urbanas quentes e densas, bem como à avaliação de sua contribuição para a intensificação do efeito de ilha de calor urbana [7].

Os sistemas BIPV apresentam limitações associadas à dependência da radiação solar direta, ao sombreamento e às elevadas temperaturas, fatores que reduzem sua eficiência. Além disso, sua produção é reduzida durante a noite e em dias nublados, frequentemente exigindo complementação pela rede elétrica. Em horários de pico, pode ocorrer excedente de geração que, na ausência de armazenamento ou integração eficiente à rede, resulta em ineficiências na gestão energética [8] [9] [10].

Em relação à energia eólica, observa-se que seu aproveitamento ainda é majoritariamente baseado em turbinas convencionais de maior escala, o que se reflete diretamente na produção científica da área. Em contrapartida, tecnologias de micro e pequena escala integradas às edificações — incluindo dispositivos baseados em mecanismos de vibração induzida pelo vento, como *flutter, vortex-induced vibration* e *galloping* — permanecem pouco exploradas, evidenciando uma lacuna relevante no campo de estudo [11].

No contexto urbano, as turbinas de eixo vertical (*Vertical Axis Wind Turbine* - VAWTs) apresentam vantagens em relação às de eixo horizontal (*Horizontal Axis Wind Turbine* - HAWTs), como melhor desempenho em regimes de baixa velocidade do vento, maior segurança, menor emissão de ruído e baixo custo [12]. No entanto, sua aplicação em fachadas ainda é limitada por questões relacionadas à escala dos dispositivos, às demandas de manutenção e à compatibilidade estética com a arquitetura [6].

Adicionalmente, o desempenho de sistemas eólicos de pequena escala depende fortemente de variáveis locais, como velocidade e direção do vento, condições de implantação e tipologia dos dispositivos, o que restringe sua viabilidade a contextos específicos. Sua integração à envoltória envolve desafios relacionados à compatibilidade estrutural, resistência às cargas de vento, geração de ruído, exigências de segurança e custos de instalação e manutenção, especialmente em edificações preexistentes. Em ambientes urbanos, a elevada variabilidade e imprevisibilidade do

vento, associadas à complexidade do escoamento influenciado pela morfologia construída, comprometem a estabilidade da geração energética e dificultam tanto a avaliação das condições eólicas quanto a seleção e instalação das turbinas. Como consequência, a literatura evidencia a ausência de análises abrangentes sobre a resiliência energética desses sistemas em regiões tropicais, apontando lacunas relacionadas à escassez de dados, às incertezas climáticas e à ausência de metodologias padronizadas [11] [12].

Por fim, a adoção de tecnologias de geração energética integradas à envoltória é condicionada por fatores construtivos, econômicos e institucionais. A implementação de sistemas BIPV enfrenta obstáculos legais, administrativos, comerciais e técnicos, além da aversão ao risco por parte do setor público [13] [14]. O elevado investimento inicial e a complexidade técnica também dificultam sua aceitação [1].

POTENCIALIDADES

A literatura destaca o potencial de integração de tecnologias energéticas na escala do edifício. A complementaridade entre fontes renováveis, como a energia solar e a eólica, contribui para a estabilidade da geração energética ao longo do tempo, uma vez que períodos de menor disponibilidade solar tendem a coincidir com maior disponibilidade de vento, e vice-versa [15]. Assim, os sistemas híbridos configuram-se como uma solução eficaz aos sistemas isolados, ao integrarem diferentes fontes e promoverem maior eficiência, confiabilidade energética e melhoria das condições de conforto nos edifícios [8].

Apesar desse potencial, a aplicação da energia eólica no ambiente urbano, bem como o uso de materiais piezoelétricos[1] para a conversão do movimento do vento em eletricidade, ainda é pouco explorada, sobretudo quando comparada às soluções baseadas em energia solar. Em contrapartida, embora as fachadas solares estejam amplamente consolidadas, seu desempenho permanece condicionado por fatores como orientação, sombreamento e variabilidade da irradiância [6].

Embora as coberturas sejam mais indicadas para sistemas BIPV, especialmente em regiões tropicais, em função da maior incidência direta de radiação solar, a limitação da área de telhado em edifícios altos torna insuficiente o atendimento da demanda energética. Nesse contexto, as fachadas tornam-se estratégicas por oferecerem superfícies mais extensas para integração fotovoltaica [16]. Mesmo sob sombreamento frequente em contextos urbanos densos tropicais, os sistemas fotovoltaicos podem manter entre 20% e 25% da geração, devido à contribuição da irradiação ambiente e do albedo urbano [17].

Em climas quentes, os sistemas BIPV podem atuar como estratégia de resfriamento passivo, contribuindo para a diminuição das temperaturas internas, das cargas de resfriamento no verão e da dependência de sistemas de climatização mecânica [18]. De forma complementar, os dispositivos de sombreamento desempenham papel

[1] De acordo com [6], os materiais piezoelétricos são aqueles capazes de gerar eletricidade quando submetidos a deformação mecânica.

relevante na mitigação do superaquecimento, na redução do ofuscamento e na melhoria das condições de conforto térmico dos ocupantes [8].

Estratégias como ventilação traseira e resfriamento radiativo destacam-se por sua eficácia na redução da temperatura dos módulos, no aumento da geração de energia e na mitigação do estresse térmico dos dispositivos. Técnicas de resfriamento híbrido também apresentam resultados favoráveis, promovendo ganhos adicionais de eficiência e de produção energética [8] [19]. Ademais, a incorporação de materiais de mudança de fase (*Phase Change Materials* - PCMs) configura-se como estratégia complementar, uma vez que contribui para a estabilidade térmica dos ambientes, ao reduzir picos de carga e amortecer variações de temperatura interna entre 2 e 5 °C [20].

Além dessas estratégias, a literatura destaca soluções arquitetônicas como fachadas cinéticas e de dupla pele, que ampliam o desempenho energético da envoltória. As fachadas cinéticas incorporam sistemas dinâmicos responsivos às condições ambientais, configurando-se como uma solução viável para a conversão de energia eólica [6]. Já as fachadas de dupla pele utilizam uma cavidade de ar entre duas camadas de envoltória, atuando como um amortecedor térmico [21].

Por fim, percebe-se que a estética constitui uma característica fundamental desses sistemas. Avanços recentes nas tecnologias fotovoltaicas ampliam as possibilidades de integração arquitetônica, com módulos de diferentes cores, texturas, formatos e níveis de transparência, favorecendo sua adequação à intenção projetual e às demandas do edifício [22]. Ademais, os sistemas BIPV apresentam potencial ainda pouco explorado de ampliar a acessibilidade energética, ao viabilizar a geração descentralizada de eletricidade e reduzir custos para populações de baixa renda [1].

Modelagem e Simulação Computacional

Estudos de simulação energética têm sido amplamente utilizados na análise do desempenho de edificações, por possibilitarem a avaliação de diferentes cenários de projeto e do comportamento de sistemas integrados à envoltória. Programas como TRNSYS e EnergyPlus destacam-se na investigação de variáveis como potencial de geração de energia nas fachadas, efeitos do sombreamento e consumo elétrico, além de contribuírem para tornar as análises mais acessíveis e econômicas [23]. De forma complementar, o software Rhinoceros associado ao plug-in Grasshopper amplia as possibilidades de modelagem e otimização paramétrica, enquanto plug-ins como *Ladybug* e *Honeybee* permitem simulações ambientais, incluindo desempenho energético, análise de iluminação natural e conforto térmico [24] [25].

No contexto da energia eólica urbana, a simulação numérica por meio da dinâmica dos fluidos computacional (*Computational Fluid Dynamics - CFD*) é amplamente empregada na análise do comportamento do vento em ambientes urbanos, sendo considerada uma abordagem eficiente para a caracterização da turbulência em edificações [12]. Além disso, avanços no uso de inteligência artificial e aprendizado de máquina (*Machine Learning* - ML) têm ampliado as capacidades das abordagens computacionais na engenharia eólica, especialmente na previsão de parâmetros aerodinâmicos e no comportamento do fluxo do vento [26].

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presente revisão permitiu mapear o estado da arte das tecnologias de envoltórias ativas, evidenciando avanços relevantes, sobretudo no desenvolvimento de sistemas fotovoltaicos integrados às edificações. Entretanto, observa-se que a produção científica permanece fragmentada, com predominância de abordagens isoladas, evidenciando uma lacuna na investigação de sistemas híbridos fotovoltaico-eólicos na escala da edificação, especialmente em contextos de clima tropical, no qual as condições microclimáticas influenciam diretamente o desempenho energético.

A integração de sistemas fotovoltaicos às fachadas configura-se como estratégia consolidada para ampliar a geração distribuída em áreas urbanas densas, contribuindo para a eficiência energética das edificações. Em contrapartida, a inserção de sistemas eólicos no ambiente urbano ainda enfrenta limitações técnicas associadas à complexidade do escoamento do vento, à variabilidade dos regimes e à dificuldade de prever seu comportamento em meio à morfologia urbana, o que impacta diretamente seu desempenho.

Embora a integração híbrida entre sistemas fotovoltaicos e eólicos apresente potencial para mitigar a intermitência das fontes renováveis e melhorar a estabilidade da geração, sua aplicação ainda carece de consolidação. A escassez de estudos que articulem desempenho energético, condições microclimáticas e configuração urbana evidencia a necessidade de abordagens mais integradas.

Diante disso, destaca-se a necessidade de avanço em modelos multifísicos que permitam simular de forma mais precisa a interação entre radiação solar, vento e ambiente construído. Além disso, a formulação de diretrizes projetuais orientadas ao desempenho é fundamental para viabilizar a integração desses sistemas, contribuindo para edificações mais eficientes, adaptadas ao clima e alinhadas aos princípios de conforto ambiental.

DECLARAÇÃO

Durante a preparação deste artigo, o primeiro autor utilizou o Tradutor DeepL, nas versões gratuita e Pro, como ferramenta de apoio à tradução dos artigos científicos em língua inglesa consultados durante a revisão de literatura. A versão gratuita do ChatGPT também foi utilizada, quando necessário, como ferramenta de apoio à melhoria da coesão e clareza textual. Após a utilização dessas ferramentas, todo o conteúdo foi integralmente revisado e editado pelas autoras, que assumem total responsabilidade pelo conteúdo e pela versão final publicada.

REFERÊNCIAS

[1] BATISTA, F.; GUIMARÃES, A. S.; PALMERO-MARRERO, A. I. Building Integrated Photovoltaics: a multi-level design review for optimized implementation. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 220, set. 2025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.115837

[2] CHEN, X. et al. An interdisciplinary review of the wind-powered building skin. **Journal of Building Engineering**, v. 95, out. 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.110324

[3] SOUZA, M. T.; SILVA, M. D.; CARVALHO, R. Revisão integrativa: o que é e como fazer. **Einstein** (São Paulo), v. 8, n. 1, p. 102-106, jan. 2010. DOI: https://doi.org/10.1590/S1679-45082010RW1134

[4] CALISE, F. et al. Dynamic modelling and thermoeconomic analysis of micro wind turbines and building integrated photovoltaic panels. **Renewable Energy**, v. 160, p. 633-652, nov. 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.06.075

[5] XIONG, S. et al. Mapping the path to zero: 3D high-resolution spatial analysis of building energy consumption and solar generation potential in Singapore. **Energy and Buildings**, v. 350, jan. 2026. DOI: https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2025.116673

[6] MASSOUD, P. Harnessing wind energy through responsive kinetic façades for sustainable building design. **Journal of Umm Al-Qura University for Engineering and Architecture**, dez. 2025. DOI: https://doi.org/10.1007/s43995-025-00272-4

[7] FOROUTANFAR, F.; TEJEDOR, B.; CASALS, M. Rethinking BIPVs: Evaluating the thermal trade-offs of building-integrated photovoltaics. **Energy and Buildings**, v. 348, dez. 2025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2025.116451

[8] BOSU, I. et al. Applied single and hybrid solar energy techniques for building energy consumption and thermal comfort: A comprehensive review. **Solar Energy**, v. 259, p. 188–228, jul. 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.solener.2023.05.006

[9] SUSAN, S.; WARDHANI, D. Building integrated photovoltaic as GREENSHIP'S on site renewable energy tool. **Results in Engineering**, v. 7, set. 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.rineng.2020.100153

[10] DHANAPAL, K.; RAGUPATHY, P.; CHINNADURAI, N. Energy efficient machine learning optimization framework for hybrid renewable generation in BIPV systems using DRL-ANN synergy. **Sustainable Computing: Informatics and Systems**, v. 50, jun. 2026. DOI: https://doi.org/10.1016/j.suscom.2026.101320

[11] CALAUTIT, K.; JOHNSTONE, C. State-of-the-art review of micro to small-scale wind energy harvesting technologies for building integration. **Energy Conversion and Management: X**, v. 20, out. 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2023.100457

[12] DÍAZ, A. V.; MOYA, I. H. Urban wind energy with resilience approach for sustainable cities in tropical regions: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 199, jul. 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114525

[13] AKATA, A. M. E. A.; NJOMO, D.; AGRAWAL, B. Assessment of Building Integrated Photovoltaic (BIPV) for sustainable energy performance in tropical regions of Cameroon. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 80, p. 1138-1152, dez. 2017. DOI: https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.155

[14] 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**, v. 169, nov. 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112950

[15] KRISTIANSEN, A. B.; MA, T.; WANG, R. Z. Perspectives on industrialized transportable solar powered zero energy buildings. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 108, p. 112-124, jul. 2019. DOI: https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.03.032

[16] MENDIS, T. et. al. Economic potential analysis of photovoltaic integrated shading strategies on commercial building facades in urban blocks: A case study of Colombo, Sri Lanka. **Energy**, v. 194, mar. 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.116908

[17] KARUPPANNAN, S. B.; RAO, B. N.; REDDY, K. S. Power generation potential of PV panels on building facades - facing cardinal directions in tropical climatic conditions. **Solar Energy Advances**, v. 5, set. 2025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.seja.2025.100118

[18] ZHOU, L.; QI, F.; YAN, X. A review of research on the passive effect of building photovoltaic systems and analysis of influencing factors. **Solar Energy**, v. 278, ago. 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.solener.2024.112766

[19] ALAO, K. T. et al. A comprehensive review of radiative cooling technologies and their integration with Photovoltaic (PV) systems: Challenges, opportunities, and future directions. **Solar Energy**, v. 292, maio 2025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.solener.2025.113445

[20] BARBHUIYA, S. et al. Next-generation building envelopes: Smart materials, energy efficiency and environmental impact. **Next Materials**, v. 9, out. 2025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.nxmate.2025.101226

[21] TAHMASBI, F. et al. Energy-efficient building façades: A comprehensive review of innovative technologies and sustainable strategies. **Journal of Building Engineering**, v. 99, abr. 2025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.111643

[22] MARCHWIŃSKI, J.; LUCCHI, E. Firmitas, Utilitas, and Venustas of photovoltaic architecture. **Solar Energy**, v. 282, nov. 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.solener.2024.112974

[23] BIYIK, E. et al. A key review of building integrated photovoltaic (BIPV) systems. **Engineering Science and Technology, an International Journal**, v. 20, n. 3, p. 833–858, jun. 2017. DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.jestch.2017.01.009

[24] XIAO, Z. et al. Sustainable adaptation of heritage buildings in tropical rainforest climates: The innovative practice of Tanjong Pagar Railway Station in Singapore. **Energy and Buildings**, v. 335, maio 2025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2025.115560

[25] LI, X; GOU, Z. Urban morphology and energy self-sufficiency: A comparative study of residential blocks in eight global cities. **Cities**, v. 166, nov. 2025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cities.2025.106240

[26] KWOK, K. C. S.; HU, G. Wind energy system for buildings in an urban environment. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 234, mar. 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jweia.2023.105349