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

Aplicação de Algoritmo Evolutivo na Otimização de Brises Fotovoltaicos em sala de aula de um edifício institucional

Aplicación de un Algoritmo Evolutivo para la Optimización de Brise-Soleil Fotovoltaicos en un Aula de un Edificio Institucional

Application of an Evolutionary Algorithm for the Optimization of Photovoltaic Louvers in a Classroom of an Institutional Building

Eficiência Energética / *Eficiencia Energética/ Energy Efficiency*

Pilenghi, Caroline
Mestranda em Arquitetura e Urbanismo pela Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, Brasil, carolinepilenghi@gmail.com

Cunha, Eduardo Grala
Professor, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, Brasil, eduardogralacunha@yahoo.com.br

Soares, Roberta Mulazzani Doleys
Professora, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, Brasil, soares.roberta@ufpel.edu.br

Silva, Antonio Cesar Silveira Baptista
Professor, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, Brasil, antoniocesar.sbs@gmail.com

Resumo

O estudo analisa a integração de sistemas fotovoltaicos em dispositivos de sombreamento na fachada Nordeste de uma sala de aula em Pelotas, visando otimizar o arranjo dos brises para reduzir o consumo e maximizar a geração de energia através de abordagem multiobjetivo. Foram realizadas simulações computacionais para três situações: no caso base, utilizaram-se brises a 25° perpendiculares à fachada, com módulos fotovoltaicos voltados para o norte, simulando apenas no EnergyPlus; no caso 1, combinou-se o EnergyPlus com o algoritmo evolutivo NSGA-II, cujos parâmetros consideraram ângulos dos brises variando de 0° a 360° em relação à fachada; e no caso 2, os ângulos foram ajustados conforme o azimute solar. O caso base gerou 836,86 kWh/ano com consumo de 17.388,75 kWh/ano (4,81% de geração), enquanto o caso 1 produziu 940,29 kWh/ano (5,39%) e o caso 2 alcançou 1.083,80 kWh/ano (6,21%). O estudo contribui com soluções voltadas à melhoria da eficiência energética em edifícios, demonstrando que pequenas alterações nos ângulos dos brises podem otimizar a relação entre geração e consumo de energia elétrica. A pesquisa evidencia que a comparação entre os cenários otimizados, obtidos por meio da aplicação de um algoritmo evolutivo, e o cenário de referência, no qual os brises possuem angulação pré-definida e foram simulados exclusivamente no EnergyPlus, revelou ganhos significativos na geração de energia, com potencial de aumento na produção anual de até 246,95 kWh.

Palavras-chave: Dispositivo de sombreado fotovoltaico. Brises fotovoltaicos. Algoritmo Evolutivo Multiobjetivo (MOEA). Optimización. Eficiencia Energética.

Resumen

El estudio analiza la integración de sistemas fotovoltaicos en dispositivos de sombreado en la fachada noreste de una sala de clases en Pelotas, con el objetivo de optimizar la disposición de los brise-soleil para reducir el consumo y maximizar la generación de energía mediante un enfoque multiobjetivo. Se realizaron simulaciones computacionales para tres escenarios: en el caso base, se utilizaron brise-soleil a 25°, perpendiculares a la fachada, con módulos fotovoltaicos orientados hacia el norte, simulando únicamente en EnergyPlus; en el caso 1, se combinó EnergyPlus con el algoritmo evolutivo NSGA-II, cuyos parámetros consideraron ángulos de los brise-soleil que variaban de 0° a 360° con respecto a la fachada; y en el caso 2, los ángulos se ajustaron de acuerdo con el azimut solar. El caso base generó 836,86 kWh/año con un consumo de 17.388,75 kWh/año (4,81% de generación), mientras que el caso 1 produjo 940,29 kWh/año (5,39%) y el caso 2 alcanzó 1.083,80 kWh/año (6,21%). El estudio aporta soluciones orientadas a la mejora de la eficiencia energética en edificios, demostrando que pequeños ajustes en los ángulos de los brise-soleil pueden optimizar la relación entre la generación y el consumo de energía eléctrica. La investigación evidencia que la comparación entre los escenarios optimizados, obtenidos mediante la aplicación de un algoritmo evolutivo, y el escenario de referencia, en el que los brise-soleil tienen una angulación predefinida y fueron simulados exclusivamente en EnergyPlus, reveló ganancias significativas en la generación de energía, con un aumento potencial en la producción anual de hasta 246,95 kWh.

Palabras clave: Dispositivo de sombreado fotovoltaico. Brise fotovoltaicos. Algoritmo Evolutivo Multiobjetivo (MOEA). Optimización. Eficiencia Energética.

Abstract

The study analyzes the integration of photovoltaic systems into shading devices on the northeast façade of a classroom in Pelotas, aiming to optimize the arrangement of the brise-soleils to reduce energy consumption and maximize energy generation through a multi-objective approach. Computational simulations were carried out for three scenarios: in the baseline case, brise-soleils were set at 25°, perpendicular to the façade, with photovoltaic modules facing north, and simulated only in EnergyPlus; in Case 1, EnergyPlus was combined with the evolutionary algorithm NSGA-II, allowing the brise angles to vary from 0° to 360° relative to the façade; and in Case 2, the angles were adjusted according to the solar azimuth. The baseline case generated 836.86 kWh/year with a consumption of 17,388.75 kWh/year (4.81% of generation), while Case 1 produced 940.29 kWh/year (5.39%), and Case 2 reached 1,083.80 kWh/year (6.21%). The study contributes to solutions aimed at improving energy efficiency in buildings, demonstrating that small adjustments in the angles of the brise-soleils can optimize the balance between electricity generation and consumption. The research shows that the comparison between the optimized scenarios, obtained through the application of an evolutionary algorithm, and the reference scenario, in which the brise-soleils have a predefined angle and were simulated exclusively in EnergyPlus, revealed significant gains in energy generation, with a potential annual increase of up to 246.95 kWh.

Keywords: Photovoltaic shading device. Photovoltaic louvers. Multi-Objective Evolutionary Algorithm (MOEA). Optimization. Energy efficiency.

Introdução

A preocupação com a crise energética e o impacto ambiental são os principais motivadores na busca por soluções que promovam o uso de energias renováveis. Paralelamente, em regiões de clima subtropical úmido, como no sul do Brasil, as condições climáticas favorecem a utilização de sistemas de climatização mecânica, o que, por sua vez, acarreta um aumento no consumo de energia elétrica (Pagel et al., 2022).

No Brasil, as usinas hidrelétricas são a principal fonte de energia renovável para a geração de eletricidade, com uma capacidade instalada de 109,9 GW. Esse predomínio se deve ao custo competitivo, à abundância de recursos naturais e à confiabilidade comprovada dessa tecnologia ao longo do tempo (Empresa de Pesquisa Energética – EPE, 2024). No entanto, em 2023, a matriz elétrica brasileira passou por mudanças impulsionadas pela estabilidade do regime hídrico e pelo crescimento da geração eólica e solar. A capacidade instalada aumentou 9,4% em relação a 2022, com destaque para essas fontes renováveis, que alcançaram 95,8 TWh na geração centralizada e 50,6 TWh na geração distribuída, registrando expansões de 20,7% e 54,8%, respectivamente (Empresa de Pesquisa Energética – EPE, 2024).

Os edifícios públicos e comerciais, devido à sua tipologia, tendem a apresentar alta geração de carga térmica e uma demanda energética expressiva. Nesse cenário, fatores como as condições climáticas externas, o design arquitetônico e os requisitos de conforto térmico desempenham um papel fundamental na definição do desempenho térmico e da eficiência energética dessas construções (Marcondes, 2010).

O progresso tecnológico na construção civil, aliado à crescente adoção de métodos avançados de otimização de projetos, tem se tornado cada vez mais presente, refletindo um aumento significativo na conscientização sobre as questões sustentáveis no planejamento da envoltória das edificações (Gao et al., 2022).

A integração de sistemas fotovoltaicos nas construções tem se tornado uma tendência crescente entre os arquitetos, destacando-se os brises fotovoltaicos, que oferecem uma solução inovadora ao combinar proteção solar com a geração de energia elétrica, promovendo maior conforto térmico e eficiência energética (Zhang et al., 2017). Dessa forma, o aproveitamento da radiação solar para a geração de energia está diretamente relacionado à redução da carga de resfriamento do ambiente. Os dispositivos de sombreamento nas edificações se mostram uma técnica eficaz, capaz de reduzir o consumo total de energia em até 55% (Uribe et al., 2018). Embora já existam estudos sobre brises fotovoltaicos, a avaliação de parâmetros específicos para otimizar esses projetos ainda é um campo pouco explorada.

O estudo de Liang et al. (2024) mostrou que a criação de um modelo paramétrico com design estratégico para brises fotovoltaicos contribui para a avaliação do desempenho energético do edifício, permitindo uma redução de até 35% na carga de resfriamento e a geração de até 46% da energia consumida por uma sala. Já a pesquisa de Ito e Lee (2024) apresentou um sistema de brises fotovoltaicos ajustáveis automaticamente conforme o movimento do sol, aumentando a produção diária de energia elétrica em 9,3%.

O EnergyPlus (EP) é um software amplamente reconhecido e utilizado para avaliar a eficiência energética e o conforto térmico em edificações. Sua flexibilidade permite a criação de modelos de simulação configuráveis de acordo com as diretrizes da NBR 15575. Além disso, o EP oferece diversas opções de saída, possibilitando comparações detalhadas. Estudos avançados

frequentemente incorporam análises paramétricas, evolucionárias e multiobjetivo, muitas vezes combinadas com Inteligência Artificial para aprofundar e ampliar a complexidade das avaliações.

A avaliação multiobjetivo tem o propósito de identificar diversas soluções que satisfaçam duas ou mais funções objetivo (Miettinen, 2012). Um dos algoritmos evolutivos multiobjetivo mais utilizados na análise de desempenho de edificações é o NSGA-II (DEB et al., 2002). Esse algoritmo seleciona os indivíduos mais aptos de uma população inicial e os submete a processos de reprodução, combinação e mutação, conforme a frequência definida pelo código implementado. O conjunto das melhores soluções, que não são superadas por nenhuma outra, formam a fronteira de Pareto. Essa abordagem permite classificar os indivíduos mais aptos e calcula a distância de cada um em relação ao ponto ótimo (centro da curva de distribuição normal). Assim, quanto maior o número de soluções dominadas por um indivíduo e menor sua distância até o ponto ótimo, melhor será sua classificação (DEB et al., 2002).

Neste contexto, a pesquisa tem como objetivo analisar o impacto da incorporação de sistemas fotovoltaicos em dispositivos de sombreamento na fachada de uma sala de aula em um edifício público institucional, considerando a Zona Bioclimática 2, localizada na latitude 31° 46' 12'' sul, e focando no desempenho energético do ambiente.

O estudo busca comparar a geração e o consumo de energia do caso base com aqueles obtidos por meio da aplicação do algoritmo de otimização multiobjetivo NSGA-II. Esse algoritmo é utilizado para determinar o arranjo ideal dos brises na envoltória do edifício, visando maximizar a produção de energia elétrica e minimizar o consumo.

Objetivo

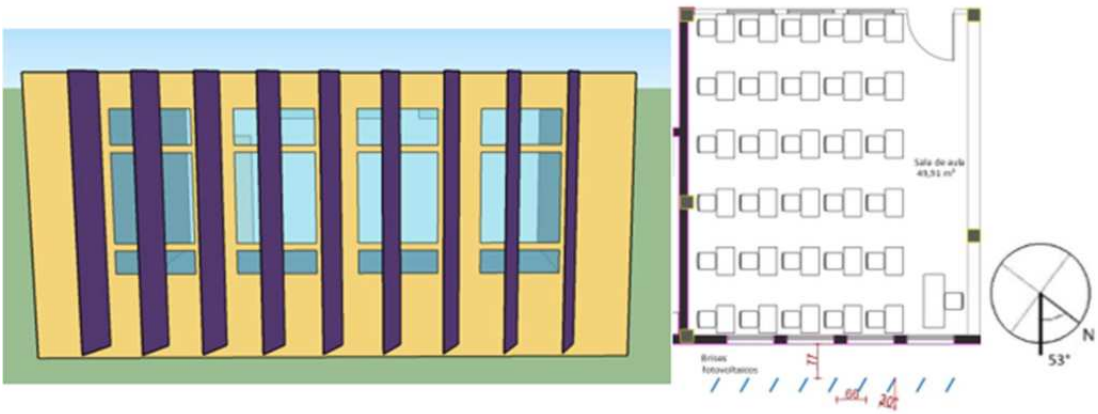
Este trabalho tem como objetivo analisar o desempenho energético de uma sala de aula em um edifício público institucional, utilizando sistemas fotovoltaicos integrados a dispositivos de sombreamento em uma fachada com orientação nordeste. Para isso, será empregada simulação computacional por meio do algoritmo de otimização multiobjetivo NSGA-II.

Metodologia

Neste trabalho, foram analisadas três situações: um caso apenas com a simulação no EnergyPlus, denominado caso base, e dois casos otimizados (caso 1 e caso 2), ambos mantendo a mesma modelagem arquitetônica do caso base, mas com diferentes ângulos de inclinação vertical dos brises, definidos por um algoritmo evolutivo. No caso 1, os ângulos variam de 0° a 360°, enquanto no caso 2 são ajustados conforme o azimute solar. O algoritmo NSGA-II é utilizado para identificar as melhores configurações fixas dos brises ao longo do ano, com o objetivo de maximizar a geração de energia e minimizar o consumo. A implementação do código foi realizada em Python, utilizando as bibliotecas Besos e Eppy, que permitem a integração com o EnergyPlus. Para atender ao objetivo proposto na pesquisa, serão adotados os seguintes procedimentos metodológicos:

1. **Caso base – Simulação apenas com o Energyplus**: A modelagem da sala foi realizada no SketchUp 2019 com o plugin Euclid versão 9.4.3. A sala estudada é um laboratório de informática, com área de 49,91 m² e dimensões de 6,62 × 7,54 m, localizada no terceiro pavimento e orientada para o nordeste, contendo na fachada nove brises fotovoltaicos verticais e fixos, com inclinação de 25° em relação ao ângulo normal à fachada, no sentido horário, a fim de direcionarem-se para o Norte. Os dispositivos estão 77 cm distantes da parede Nordeste, permitindo que as janelas de maxim ar abram em um ângulo de 45°, conforme apresentado na **Figura *1***. Após a modelagem, o caso base foi configurado no EnergyPlus versão 9.0.1.

Figura 1: Modelagem da sala com os 9 brises fotovoltaicos e planta baixa



Fonte: Autor (2024).

As paredes da sala são compostas por blocos de concreto de 14x29x19cm, rebocadas e revestidas com argamassa, ambas as faces, as quais foram representadas por uma parede equivalente devido à limitação do software em reconhecer paredes com camadas heterogêneas, mantendo as mesmas propriedades térmicas.

Os brises fotovoltaicos foram configurados como geradores de energia e não como parte das paredes, seguindo as diretrizes da fabricante. Foram utilizados módulos fotovoltaicos do tipo CIGS de 125W e com 16,4% de eficiência, eles são conhecidos por sua leveza, flexibilidade e alta densidade de potência, facilitando sua instalação em diversas estruturas arquitetônicas.

2. **Caso 1 - Análise multiobjetivo do caso base utilizando o algoritmo evolutivo NSGA-II (ângulos de 0° a 360°)**: Na análise multiobjetiva do caso 1, os parâmetros correspondem aos ângulos dos brises com uma variação de 0° e 360° em relação à fachada, durante o processo de otimização do algoritmo.
3. **Caso 2 - Análise multiobjetivo do caso base utilizando o algoritmo evolutivo NSGA-II (ângulos ajustados pelo azimute solar)**: No caso 2, a análise multiobjetivo utiliza como parâmetros os ângulos dos brises em relação à fachada, ajustados conforme o azimute solar, durante o processo de otimização do algoritmo.

Resultados

Os resultados são apresentados para o caso base, bem como para os casos 1 e 2, e foram obtidos a partir dos dados de saída Output:Meter: Electricity:Facility [J] e ElectricityProduced:Facility [J]. Embora os valores estejam originalmente em joules, foram convertidos para kWh para facilitar a análise.

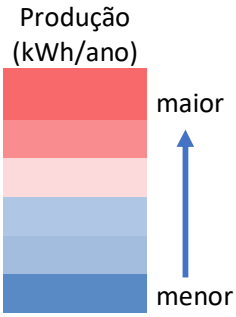
Para o caso base, os dados de saída, da simulação com o Energyplus, registraram uma produção de energia elétrica anual de 836,86 kWh e um consumo de 17.388,75 kWh/ano, correspondendo a 4,81% de geração em relação ao consumo.

A análise multiobjetivo do caso 1 gerou 6 soluções ótimas que compõem a fronteira de Pareto, resultantes da otimização com o algoritmo evolutivo NSGA-II. O algoritmo produziu diferentes angulações para cada brise, com variações aleatórias de 25° a 353° em relação à fachada, no

sentido horário. Para a máxima produção de energia a variação angular ficou entre 37° a 221°. A Tabela 1 apresenta os melhores resultados de produção e consumo de energia.

Tabela 1: Conjunto de soluções ótimas da fronteira de pareto - Caso 1 .

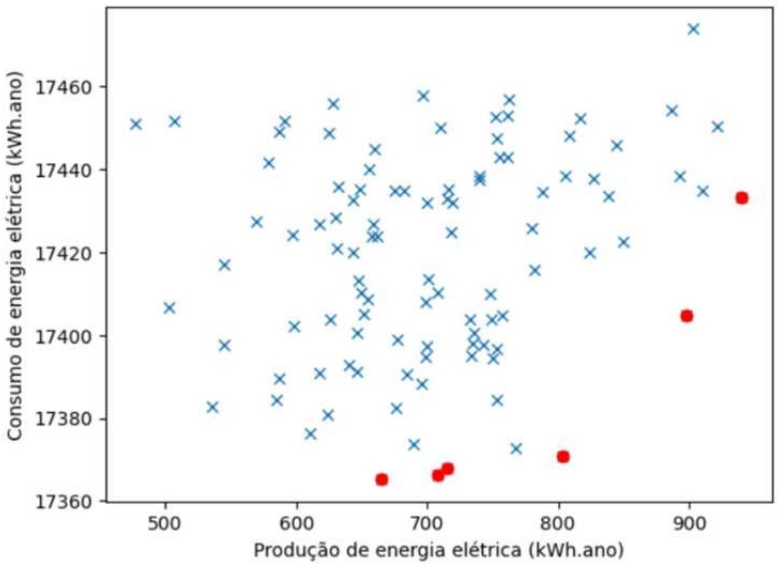
Pareto ótimo	Produção (kWh/ano)	Consumo (kWh/ano)	Produção/Consumo (%)
1	**665,25**	17.365,16	3,83%
2	**707,54**	17.366,19	4,07%
3	**898,18**	17.404,80	5,16%
4	**940,29**	17.433,08	5,39%
5	**714,67**	17.367,86	4,11%
6	**803,33**	17.370,91	4,62%



Fonte: Autor (2024).

Para obter os resultados apresentados, foi definida uma população inicial de 100 indivíduos e realizadas 30 gerações, possibilitando que o algoritmo explorasse e refinasse as soluções durante o processo evolutivo. Cada ponto no gráfico representa uma solução na fronteira de Pareto, mostrada na Figura 2, com diferentes níveis de produção e consumo de energia.

Figura 2: Fronteira de Pareto – Caso 1

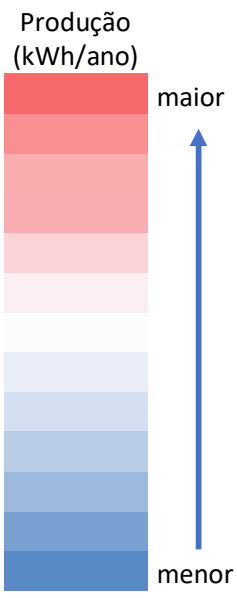


Fonte: Autor (2024).

No caso 2, a análise do algoritmo evolutivo NSGA-II resultou em 13 soluções ótimas, compondo a fronteira de Pareto. O algoritmo gerou diferentes angulações para cada brise, com variações aleatórias, nos parâmetros ajustados de acordo com o azimute solar. Nessa configuração, os ângulos dos brises tiveram uma variação com valores entre 90° e 268°, em relação a fachada, no sentido horário. Para a máxima produção de energia a variação angular ficou entre 126° a 222°. A Tabela 2 apresenta os melhores resultados em termos de produção e consumo de energia anual, considerando toda a carga da sala de aula.

Tabela 2: Conjunto de soluções ótimas da fronteira de pareto - Caso 2

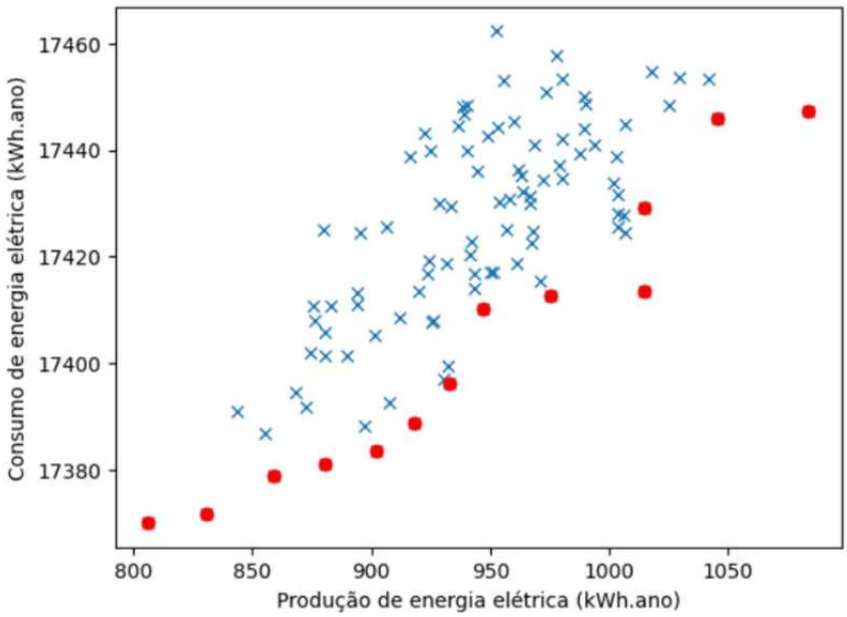
Pareto ótimo	Produção (kWh/ano)	Consumo (kWh/ano)	Produção/ Consumo (%)
1	**1.014,90**	17.429,04	5,82%
2	**975,27**	17.412,72	5,60%
3	**1.014,44**	17.413,62	5,83%
4	**932,92**	17.396,19	5,36%
5	**1.083,80**	17.447,30	6,21%
6	**1.045,51**	17.446,02	5,99%
7	**830,76**	17.371,68	4,78%
8	**902,08**	17.383,64	5,19%
9	**946,69**	17.410,23	5,44%
10	**859,15**	17.378,80	4,94%
11	**880,75**	17.381,10	5,07%
12	**806,19**	17.370,03	4,64%
13	**918,15**	17.388,84	5,28%



Fonte: Autor (2024).

Para calcular os ângulos perpendiculares dos módulos fotovoltaicos em relação ao sol, foi implementado um laço de repetição na programação em Python. Esse laço determina os parâmetros, para otimização do algoritmo, que são os ângulos dos brises, ajustados de acordo com o azimute solar. A configuração adotou uma população inicial de 100 indivíduos e um total de 30 gerações, assim como no caso 1. Cada ponto no gráfico representa uma solução na fronteira de Pareto, conforme ilustrado na Figura 3.

Figura 3: Fronteira de Pareto – Caso 2



Fonte: Autor (2024).

Conclusões / Conclusiones / Conclusions

O EnergyPlus (EP) é um software amplamente empregado para a análise da eficiência energética e do conforto em edificações. Para ampliar as possibilidades de alcançar soluções ideais, foi utilizado o algoritmo evolutivo NSGA-II, que permite otimizar múltiplos objetivos simultaneamente.

Diante disso, este trabalho teve como objetivo otimizar a instalação e o desempenho de brises fotovoltaicos em uma edificação real. Para isso, foram comparados os resultados do caso base, que utilizou exclusivamente o EnergyPlus, com os casos 1 e 2, nos quais o software foi integrado a uma ferramenta de Inteligência Artificial para aprimorar a otimização dos brises. O foco principal foi maximizar a geração de energia e o conforto, ao mesmo tempo em que se buscou minimizar o consumo de eletricidade.

Os resultados da Figura 2 e Figura 3, indicam que a tentativa de otimizar a produção de energia dentro de um contexto de evolução multiobjetivo pode impactar negativamente o consumo de

energia, criando situações em que a melhoria de um aspecto compromete outro. Uma possível explicação para esse fenômeno é que o desempenho dos brises fotovoltaicos é fortemente influenciado pelo clima local e pela sazonalidade. Como a posição do sol varia ao longo do ano, tanto a radiação solar captada pelos brises quanto a sombra projetada no ambiente interno sofrem alterações. Consequentemente, podem surgir períodos conflitantes em que a necessidade de gerar energia coincide com momentos em que se deseja minimizar o sombreamento. A maximização da geração de eletricidade pode exigir um maior bloqueio da radiação solar, o que, por sua vez, pode impactar o consumo de energia para iluminação e climatização.

Outro aspecto relevante a ser considerado é a localização da edificação, uma vez que se trata de um prédio existente com fachada voltada para o Nordeste. Uma orientação voltada para o Norte, por exemplo, proporcionaria uma eficiência significativamente maior.

A comparação entre os cenários otimizados, obtidos por meio da análise multiobjetivo, e o caso base, onde os brises possuem uma angulação pré-definida simulada apenas no EnergyPlus, evidenciou ganhos significativos na geração de energia elétrica, podendo chegar a acréscimos de até 246,95 kWh/ano. No cenário em que os parâmetros variaram de 0° a 360° (caso 1), a faixa de ângulos que resultou na maior produção de energia foi de 37° a 221°. Apesar de não terem sido observadas diferenças significativas, houve um aumento de 12,36% na geração de energia em comparação com o modelo de angulação fixa predefinida, simulado exclusivamente no EnergyPlus. Por outro lado, quando os ângulos foram ajustados de acordo com o azimute solar (caso 2), o ganho foi mais expressivo: um incremento de 29,51%. Nesse caso, os ângulos dos brises variaram entre 126° e 222° em relação à fachada, resultando na máxima produção de energia. Apesar do aumento na geração, o impacto no consumo de energia foi mínimo, com acréscimos de apenas 44,32 kWh/ano no caso 1 e 58,54 kWh/ano no caso 2, quando comparados ao caso base. Além disso, a relação entre geração e consumo de energia também foi aprimorada, apresentando um aumento de 0,58% no caso 1 e 1,40% no caso 2, reforçando o potencial da abordagem multiobjetivo na busca por soluções energeticamente mais eficientes. Esses resultados evidenciam que o uso de ferramentas de Inteligência Artificial pode contribuir para a definição dos ajustes nos ângulos de inclinação dos brises, oferecendo ao projetista propostas otimizadas que maximizam a geração de energia ao longo do ano e aprimoram a eficiência

energética do edifício. Dentre as configurações analisadas, o caso 2 destacou-se como o mais eficiente, por apresentar a melhor relação entre produção e consumo de energia elétrica.

Referências */ Referencias / References*

DEB, K. et al. **A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II**. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, v. 6, n. 2, p. 182–197, abr. 2002.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE. **Balanço Energético Nacional (BEN)**. p. 71, 2024.

GAO, Q.; YANG, Y.; WANG, Q. **An integrated simulation method for PVSS parametric design using multi-objective optimization**. Frontiers of Architectural Research, v. 11, n. 3, p. 509–526, jun. 2022.

ITO, R.; LEE, S. **Development of adjustable solar photovoltaic system for integration with solar shading louvers on building façades**. Applied Energy, v. 359, p. 122711, abr. 2024.

LIANG, X.; ZHANG, H.; SUN, B. **Parametric design of photovoltaic louver integrated shading devices for west facade windows of office buildings in central China**. Journal of Asian Architecture and Building Engineering, p. 1–15, 23 fev. 2024.

MARCONDES, M. P. **Soluções projetuais de fachadas para edifícios de escritórios com ventilação natural em São Paulo**. Doutorado em Tecnologia da Arquitetura—São Paulo: Universidade de São Paulo, 7 jun. 2010.

MIETTINEN, K. **Nonlinear multiobjective optimization**. [s.l.] Berlim: Springer Science & Business Media, 2012.

PAGEL, É. C. et al. **Ventilação natural e desempenho térmico sob diferentes configurações de aberturas em uma sala de aula**. **Ambiente Construído**, v. 22, n. 3, p. 133–157, set. 2022.

URIBE, D.; BUSTAMANTE, W.; VERA, S. **Potential of perforated exterior louvers to improve the comfort and energy performance of an office space in different climates**. Building Simulation, v. 11, n. 4, p. 695–708, ago. 2018.

ZHANG, W.; LU, L.; PENG, J. **Evaluation of potential benefits of solar photovoltaic shadings in Hong Kong**. Energy, v. 137, p. 1152–1158, out. 2017.