

**ARQUITETURA PARAMÉTRICA ORIENTADA POR DESEMPENHO POR MEIO DE
ALGORITMO EVOLUTIVO**

**PERFORMANCE-DRIVEN PARAMETRIC ARCHITECTURE VIA EVOLUTIONARY
ALGORITHM**

**ARQUITECTURA PARAMÉTRICA ORIENTADA AL RENDIMIENTO MEDIANTE
ALGORITMOS EVOLUTIVOS**

 <https://doi.org/10.56238/arev7n12-139>

Data de submissão: 12/11/2025

Data de publicação: 12/12/2025

Thiago Henrique Omena

Doutor em Arquitetura e Urbanismo

Instituição: Universidade Federal do Tocantins

E-mail: thiagoomena@uft.edu.br

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-6161-3228>

Lattes: lattes.cnpq.br/1775185585417888

Mariela Cristina Ayres de Oliveira

Doutora em Arquitetura e Urbanismo

Instituição: Universidade Federal do Tocantins

E-mail: mariela@uft.edu.br

Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-4253-6586>

Lattes: lattes.cnpq.br/5524921454744251

Eber Nunes Ferreira

Especialista em Desenho

Instituição: Universidade Federal do Tocantins

E-mail: ebernunes@uft.edu.br

Orcid: <https://orcid.org/0009-0005-9345-9818>

Lattes: lattes.cnpq.br/4839202068132279

Letícia Weber Rodrigues Brandão

Graduanda em Arquitetura e Urbanismo

Instituição: Universidade Federal do Tocantins

E-mail: leticiavweber@gmail.com

Orcid: <https://orcid.org/0009-0009-8551-9613>

Lattes: lattes.cnpq.br/0575852402170237

Amanda Araújo Siqueira

Graduanda em Arquitetura e Urbanismo

Instituição: Universidade Federal do Tocantins

E-mail: amanda.araujo@uft.edu.br

Orcid: <https://orcid.org/0009-0009-2701-9979>

Lattes: lattes.cnpq.br/9852662744497577

Isabela Vieira Magalhães
Graduanda em Arquitetura e Urbanismo
Instituição: Universidade Federal do Tocantins
E-mail: Isabela.ivm.to@gmail.com
Orcid: orcid.org/0009-0004-1786-0258
Lattes: lattes.cnpq.br/0135258884325015

RESUMO

O Projeto Assistido por Algoritmos tem se consolidado como uma abordagem estratégica para o desenvolvimento de soluções arquitetônicas orientadas por desempenho. Esta pesquisa investigou o comportamento térmico de uma edificação multifamiliar em Palmas–TO por meio da integração entre modelagem paramétrica, simulação ambiental e algoritmos evolutivos. Com o uso do Grasshopper, dos plugins LadyBug, HoneyBee e do algoritmo genético Galapagos, foram realizadas simulações de irradiação solar com o objetivo de otimizar a orientação da edificação e avaliar o efeito de varandas como dispositivos de sombreamento passivo. A metodologia incluiu a modelagem paramétrica da quadra 207 Sul, a calibração dos parâmetros de simulação e a análise de múltiplos cenários de implantação e dimensões de varandas. Os resultados demonstram que configurações otimizadas podem reduzir em mais de 74% a incidência de radiação solar nas fachadas, evidenciando o papel decisivo da parametrização e dos algoritmos evolutivos no aprimoramento do desempenho térmico e na qualificação ambiental do processo projetual.

Palavras-chave: Desempenho Térmico. Algoritmo Evolutivo. Arquitetura Paramétrica. Eficiência Energética.

ABSTRACT

Algorithm-Assisted Design (AAD) has become a strategic approach for developing performance-oriented architectural solutions. This research investigated the thermal behavior of a multi-family building in Palmas, Tocantins, Brazil, through the integration of parametric modeling, environmental simulation, and evolutionary algorithms. Using Grasshopper, the LadyBug and HoneyBee plugins, and the Galapagos genetic algorithm, solar irradiance simulations were performed to optimize the building's orientation and evaluate the effect of balconies as passive shading devices. The methodology included parametric modeling of block 207 South, calibration of simulation parameters, and analysis of multiple implementation scenarios and balcony dimensions. The results demonstrate that optimized configurations can reduce solar radiation incidence on the facades by more than 74%, highlighting the decisive role of parameterization and evolutionary algorithms in improving thermal performance and enhancing the environmental quality of the design process.

Keywords: Thermal Performance. Evolutionary Algorithm. Parametric Architecture. Energy Efficiency.

RESUMEN

El Diseño Asistido por Algoritmos (DAA) se ha convertido en un enfoque estratégico para el desarrollo de soluciones arquitectónicas orientadas al rendimiento. Esta investigación investigó el comportamiento térmico de un edificio multifamiliar en Palmas, Tocantins, Brasil, mediante la integración de modelado paramétrico, simulación ambiental y algoritmos evolutivos. Utilizando Grasshopper, los plugins LadyBug y HoneyBee, y el algoritmo genético Galapagos, se realizaron simulaciones de irradiancia solar para optimizar la orientación del edificio y evaluar el efecto de los balcones como dispositivos pasivos de sombreado. La metodología incluyó el modelado paramétrico del bloque 207 Sur, la calibración de los parámetros de simulación y el análisis de múltiples

escenarios de implementación y dimensiones de los balcones. Los resultados demuestran que las configuraciones optimizadas pueden reducir la incidencia de la radiación solar en las fachadas en más de un 74%, lo que destaca el papel decisivo de la parametrización y los algoritmos evolutivos para mejorar el rendimiento térmico y la calidad ambiental del proceso de diseño.

Palabras clave: Rendimiento Térmico. Algoritmo Evolutivo. Arquitectura Paramétrica. Eficiencia Energética.

1 INTRODUÇÃO

O desempenho térmico das edificações é um fator determinante para garantir a eficiência energética e o conforto ambiental, especialmente em regiões de clima quente e seco, como Palmas-TO. Nesse contexto, torna-se essencial adotar estratégias projetuais que considerem as condições climáticas locais e que explorem alternativas capazes de reduzir os ganhos térmicos e o consumo de energia com climatização artificial.

De acordo com o Balanço Energético Nacional de 2024, o setor residencial no Brasil destaca-se como um dos principais consumidores de eletricidade (10,7% do total), representando uma parcela significativa do consumo total de energia elétrica do país. Esses dados reforçam a relevância de se discutir soluções projetuais voltadas para a eficiência energética no ambiente construído, especialmente considerando o impacto expressivo do consumo de eletricidade no setor residencial.

O governo brasileiro tem incentivado a eficiência energética por meio da Lei nº 10.295/2001 e do Decreto nº 9.864/2019, que estabelecem regulamentações e metas para o Comitê Gestor de Indicadores e Níveis de Eficiência Energética (CGIEE). Neste cenário, o desenvolvimento de métodos projetivos voltados à eficiência energética torna-se uma exigência cada vez mais premente. E para esse tipo de análise as simulações computacionais surgem como ferramentas fundamentais.

Paralelamente, observa-se um crescente interesse na incorporação de ferramentas digitais ao processo de projeto¹ arquitetônico, permitindo a simulação, análise e otimização de variáveis ambientais desde as fases iniciais da concepção. Neste cenário, a Arquitetura Assistida por Algoritmos (*Algorithm Aided Design – AAD*) se insere como uma abordagem inovadora que, ao integrar modelagem paramétrica através de Editores Gráficos de Algoritmos, como é o caso do Grasshopper, amplia as possibilidades de explorar soluções formais e ambientais mais eficientes.

A crescente adoção de modelos paramétricos e algoritmos genéticos na arquitetura evidencia a relevância de otimizar a forma e orientação das edificações para melhorar o desempenho energético já nas fases iniciais do projeto. Estudos em climas extremos, como em Cairo e Penang, mostraram reduções significativas no consumo energético ao explorar formas geométricas variadas e métodos de otimização paramétrica (Duarte; Tolba; Ezzeldin, 2021; Mohsenzadeh *et al.*, 2021). Contudo, tais

¹ Segundo a NBR 16.636:2017, o termo processo de projeto abrange todas as etapas desde a concepção até a execução de um empreendimento, enquanto o método de projeto refere-se às técnicas e procedimentos aplicados especificamente à elaboração das soluções projetuais (ABNT, 2017). Porto (2013) observa que, embora a distinção seja relevante do ponto de vista técnico, o termo processo de projeto é amplamente utilizado na pesquisa em arquitetura como sinônimo de método. Autores como Benevolo (1993) e Omena (2019) também empregam o termo para designar o conjunto de ações projetuais, independentemente da etapa normativa. Assim, esta pesquisa adota a expressão processo de projeto para se referir às ações desenvolvidas durante o ato projetivo, considerando sua ampla aceitação na área, mesmo entendendo que o vocábulo correto deveria ser Método, que difere também do termo metodologia que se configura no estudo do(s) método(s).

pesquisas concentram-se na obtenção de indicadores finais de performance térmica, sem documentar de forma sistemática o processo de projeto (a lógica de decisão, os ciclos de iteração e as dependências entre variáveis e etapas).

É nesta lacuna que o método Fluxo-Algoritmo (FA) se posiciona como inovação metodológica, derivado do *Design Research* (Breen, 2002) e adaptado para o *Algorithm Aided Design*, por Omêna (2019) o FA propõe um mapeamento detalhado e replicável do percurso projetual: suas etapas encadeadas, “caixas de observação” explicativas e a lógica identada entre os componentes parametrizáveis.

Diferentemente da maioria dos estudos, que priorizam o resultado, esta pesquisa entrega também um protocolo claro e replicável do processo de projeto, o que contribui para o estudo de formas arquitetônicas energeticamente eficientes além de um sistema explicativo do “como” o projeto foi concebido.

Isto posto, esta pesquisa objetivou analisar e otimizar o desempenho térmico de uma edificação multifamiliar por meio da aplicação de algoritmo evolutivo no processo de projeto, utilizando os recursos do editor gráfico de algoritmos *Grasshopper* e os *plugins* *LadyBug*, *HoneyBee* e *Galapagos*. Para isso, foi desenvolvido um modelo paramétrico da quadra 207 Sul, na região central em Palmas-TO, sobre o qual foram conduzidas simulações de irradiação solar e estratégias de otimização da orientação e da forma da edificação.

Ao discutir os resultados obtidos por meio das simulações computacionais, o estudo busca evidenciar como decisões projetuais orientadas por critérios de desempenho (como a presença de varandas e a orientação solar) influenciam diretamente o comportamento térmico da edificação. Pretende-se com isto contribuir para o avanço das práticas projetuais sustentáveis, demonstrando o potencial dos algoritmos evolutivos como ferramenta decisiva na qualificação ambiental do espaço construído.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

O conforto térmico em edificações depende de variáveis interligadas, como ventilação natural, umidade do ar, temperatura e, especialmente, a radiação solar (Frota; Schiffer, 2001). Em climas quentes, como o de Palmas-TO, compreender o comportamento da radiação solar é essencial para decisões projetuais mais eficientes.

Neste contexto, a irradiância solar, definida como a energia solar incidente por unidade de área, é um dos principais fatores que influenciam o desempenho térmico das edificações (Gomez *et al.*, 2018), variando conforme estação do ano, latitude e condições atmosféricas. Isto posto, pontua-

se que modelos computacionais como *LadyBug*, *Honeybee* e *EnergyPlus* permitem simular o impacto da irradiação solar no ambiente construído, contribuindo para o desenvolvimento de estratégias passivas de climatização.

A busca por sustentabilidade e eficiência energética na construção civil tem impulsionado o uso de ferramentas como a simulação térmica, que auxilia na otimização do desempenho ambiental das edificações. Essa prática permite analisar a interação entre o ambiente construído e as condições climáticas, promovendo soluções que asseguram o conforto térmico e reduzem a dependência de sistemas artificiais de climatização (Barbosa; Aguilar; Sales, 2021).

A simulação energética considera as variáveis ambientais como temperatura, umidade, radiação e ventilação, além de materiais, entorno e orientação solar, permitindo identificar ajustes projetuais que promovam bem-estar, eficiência e menor impacto ambiental.

No contexto do design ambiental orientado por desempenho, a integração de simulações térmicas ao processo projetual tem sido potencializada por ferramentas computacionais capazes de explorar soluções mais eficientes. Nesse cenário, os Algoritmos Evolutivos (AE) se destacam como métodos de otimização inspirados na seleção natural de Darwin, aplicando princípios como seleção, cruzamento e mutação para resolver problemas complexos com múltiplas variáveis (Eiben; Smith, 2003).

Desenvolvidos inicialmente entre as décadas de 1960 e 1970 por pesquisadores como Rechenberg, Schwefel, Fogel e Holland (Mitchell, 1996), os AE têm se mostrado especialmente eficazes no campo da arquitetura, ao permitir a geração de soluções formais e ambientais otimizadas (DEB, 2001). Aplicados por meio de ferramentas como o plugin *Galapagos* no ambiente *Grasshopper*, esses algoritmos permitem explorar configurações que maximizam o conforto térmico e a eficiência energética, com base em parâmetros como ventilação, radiação solar e orientação das fachadas (Menezes; Silva, 2020). Segundo Machado e Leitão (2015), essa abordagem amplia a criatividade do projetista e automatiza processos de tomada de decisão, inserindo-se em um paradigma contemporâneo de projeto orientado por desempenho (KOHLER, 2006).

3 METODOLOGIA

A pesquisa teve início com uma revisão bibliográfica dos últimos 25 anos, utilizando as plataformas *SciELO*, *ScienceDirect* e *Google Scholar*, com foco em publicações relevantes sobre

conforto térmico, algoritmos evolutivos, e os *plugins Galapagos e LadyBug*². Essa etapa teve como objetivo identificar os avanços científicos mais significativos relacionados ao tema e embasar teoricamente as decisões metodológicas adotadas. A metodologia de pesquisa utilizada no processo de projeto é o Ciclo de Desenvolvimento de Projeto baseado em Desempenho (Omena, 2019).

3.1 SIMULAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE CONFORTO EM PALMAS-TO

A avaliação das condições de conforto térmico para o clima de Palmas–TO foi realizada por meio de simulação computacional utilizando o plugin *Ladybug Tools* no ambiente *Grasshopper/Rhinoceros*, metodologia amplamente difundida para análises ambientais paramétricas e visualização climática (ROUDSARI; PAK, 2013, p. 679). O objetivo da simulação foi identificar o desempenho térmico horário ao longo de um ano completo sem a adoção de estratégias passivas, fornecendo um cenário-base para análises comparativas posteriores.

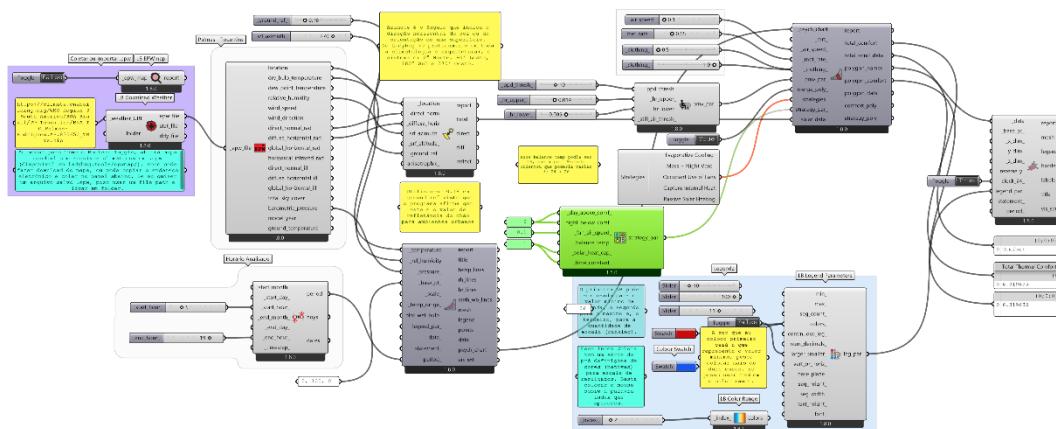
A simulação empregou o índice *Predicted Mean Vote* (PMV), criado por Fanger, que estima a sensação térmica média de um grande grupo de pessoas em função do balanço de calor entre corpo humano e ambiente (FANGER, 1970, p. 51). O PMV considera variáveis ambientais (temperatura do ar, umidade relativa, velocidade do ar e radiação térmica) combinadas com parâmetros individuais, como metabolismo e vestimenta.

Este modelo é normativamente padronizado pela ISO 7730, que define faixas de conforto aceitáveis e relaciona o PMV ao índice de insatisfação PPD (*Predicted Percentage of Dissatisfied*) conforme pontua a ISO 7730 (2005).

Foram utilizadas informações meteorológicas do arquivo .epw de Palmas–TO da estação meteorológica do Aeroporto da cidade com intervalo horário analisado definido entre 5h e 19h, abrangendo o período de ocupação predominante e representando o intervalo crítico de incidência solar direta na fachada oeste. O algoritmo da simulação pode ser aferido na figura 1.

² O *LadyBug* é um *plugin* para o *Grasshopper* que permite a análise ambiental e climática para projetos de arquitetura e urbanismo, baseada na integração de dados meteorológicos reais para simulação de desempenho energético, conforto térmico e eficiência ambiental de edificações (utilizando a base de cálculo do *EnergyPlus*). Este *plugin* faz parte do *Ladybug Tools*, um conjunto de componentes que inclui o *Honeybee* (maior detalhamento nas simulações de desempenho energético e iluminação natural), *Dragonfly* (desempenho ambiental e energético em escala urbana e distrital) e *Butterfly* (simulação de dinâmica dos fluidos computacionais ou *Computational Fluid Dynamics – CFD*, para análises do comportamento e fluxo do ar).

Figura 1 – Algoritmo utilizado na primeira parte da pesquisa.



Fonte: Autores, 2025.

O componente LB PMV *Comfort Parameters* (*pmv_par*) foi configurado com base em valores típicos para ventilação natural e ocupação leve em climas tropicais com *Metabolic rate* (*met_rate*): 0,65 met; *Clothing insulation* (*clothing*): 0,5–1,0 clo; *Air speed* de 0,1 m/s; *Humidity ratio* (*hr_lower* e *hr_upper*): 0,005 que se aproxima de 25% de umidade relativa e 0,014 que se aproxima entre 55 e 65% de umidade relativa e, PPD threshold: 10%. Esses valores seguem recomendações internacionais de conforto energético e fisiológico (SZOKOLAY, 2008, p. 156).

Não foram ativadas estratégias passivas no componente *LB Passive Strategies Parameters*, garantindo que a simulação representasse conforto exclusivamente climático, sem artifícios de ventilação, resfriamento evaporativo ou sombreamento adicional, possibilitando assim uma leitura real do impacto climático de Palmas.

O componente *solar_direction* foi configurado com azimute de 270°, correspondente à fachada oeste, cuja incidência solar direta é mais crítica no período da tarde em regiões tropicais (OLGYAY, 1963, p. 72; GIVONI, 1998, p. 134). O parâmetro *ground_reflectance* foi fixado em 0,18, valor característico de superfícies urbanas segundo a ASHRAE.

3.2 MODELAGEM PARAMÉTRICA DO ENTORNO DA EDIFICAÇÃO

Na sequência, foi realizada a modelagem paramétrica da quadra 207 Sul, em Palmas-TO, local em que a edificação modelo foi implantada (a escolha desta quadra em específico ocorreu em virtude de esta ser uma das quadras mais arborizados da cidade e, como este trabalho constitui apenas um fragmento da investigação mais ampla, a segunda etapa incluirá uma análise ambiental do impacto da vegetação local na performance térmica do modelo).

No que tange a modelagem da área analisada pela pesquisa, para a vetorização dos limites das

edificações existentes no entorno utilizou-se o software AutoCAD que, por sua vez, possuí o componente *Geolocation*, no qual foi inserida uma imagem *raster*³ como plano de fundo, sobre a qual foram desenhadas as geometrias correspondentes às edificações visíveis. Ressalta-se que todos os polígonos foram criados como figuras fechadas, requisito fundamental para que o *Grasshopper* pudesse realizar a extrusão volumétrica corretamente.

A edificação modelo, considerada como variável de controle da pesquisa, foi desenvolvida utilizando recursos de *Algorithm Aided Design* (AAD) no ambiente *Grasshopper*, vinculado ao software Rhinoceros 3D. Após a modelagem do entorno e da edificação, foram realizadas simulações computacionais com os plugins *LadyBug* e *HoneyBee*, integradas ao componente nativo *Galapagos*⁴ (algoritmo genético). As simulações avaliaram a irradiação solar tanto na fachada Noroeste quanto no edifício como um todo, visando à identificação de soluções projetuais com melhor desempenho térmico e sombreamento passivo.

Com a modelagem do entorno e da edificação modelo concluída, foram inseridos no plugin *LadyBug* os dados climáticos da cidade de Palmas-TO, obtidos a partir da plataforma www.ladybug.tools/epwmap/. Nessa etapa, foi possível simular a abóbada celeste e, com o auxílio da carta solar, configurar a deflexão magnética anual específica da localidade, bem como o norte verdadeiro ($21^{\circ}37'$), garantindo maior precisão nas análises.

3.3 CONFIGURAÇÃO E CALIBRAÇÃO DAS SIMULAÇÕES DE IRRADIAÇÃO SOLAR

Antes das simulações principais, realizou-se a calibração dos parâmetros de análise espacial (tamanho da célula e distância entre sensor e superfície) considerando as limitações computacionais e o tempo de processamento. Os tamanhos que já vem como padrão de sistema eram: o tamanho das células (1 metro x 1 metro) e a distância dos sensores em relação às superfícies analisadas (10 cm).

A partir disso, procedeu-se à calibração do sistema considerando exclusivamente a fachada Norte, como detalhado no Quadro 1, a fim de ajustar a resolução espacial e o tempo de processamento às necessidades da pesquisa (neste processo, quando a pesquisa encontrou pouca variação no resultado e, por outro lado, muito tempo de processamento de dados, tempo este que poderia inviabilizar o trabalho, foram escolhidas as calibrações que equilibrassem estas duas variáveis já mencionadas).

³ Imagem *raster* é uma imagem formada por pixels, que possuem determinada cor e valor e podem ser usadas para simular diversos elementos. Ressalta-se que esta ação poderia ter sido realizada pelo QGis ou ArcGis, a pesquisa optou pelo uso do autocad por considerar mais fluída a vetorização.

⁴ Estes componentes foram utilizados em função de serem os plugins que estão sendo investigados, atualmente, pelo grupo de pesquisa, bem como porque, são plug-ins do Rhinoceros 3D que possuem interface amigável e permitem e permite adaptações pode meio de programação aberta (não restrita apenas ao fabricante).

Isto posto, com base nas simulações iniciais, constatou-se que a variação do tamanho das células de 20 cm² para 9 cm² gerava resultados semelhantes em termos de irradiação, porém com um aumento significativo no tempo de processamento (Quadro 1).

Quanto à distância entre o sensor e as superfícies analisadas, observou-se que valores a partir de 8 cm já ofereciam resultados estáveis. Considerando que o limite mínimo suportado pelo sistema era de 1 cm, e que a distância de 4 cm apresentou um tempo de processamento satisfatório, esta foi a configuração adotada para as simulações da fachada analisada.

Quanto à distância entre o sensor e as superfícies analisadas, observou-se (quadro 1) que valores a partir de 8 cm já ofereciam resultados estáveis. Deste modo, as calibrações adotadas para as simulações da fachada analisada foram: tamanho de célula de 20 cm² e distância do sensor de 4 cm.

Quadro 1 – Avaliação de Irradiação Solar do Edifício Modelo

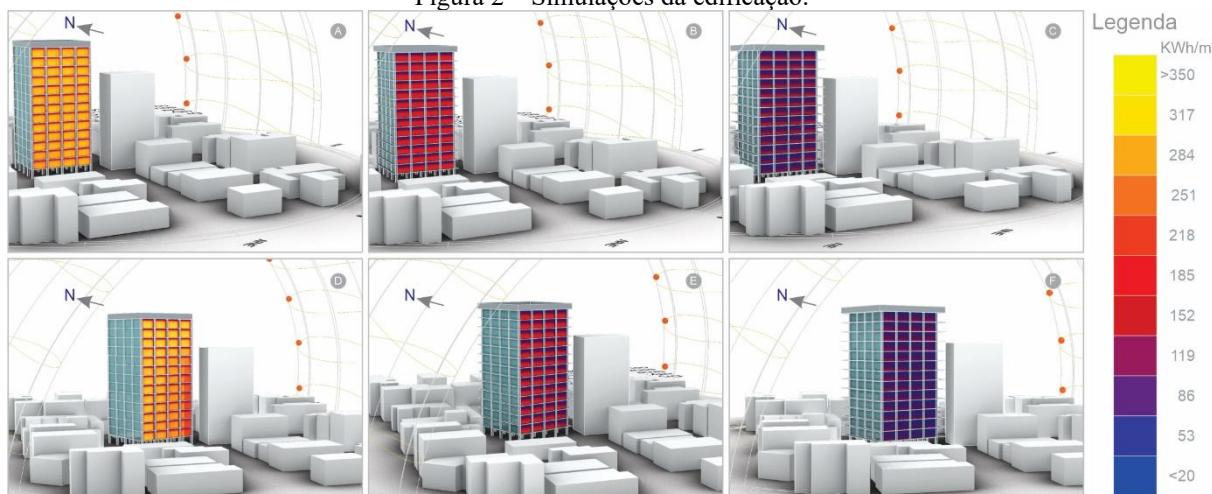
Orientação	Tipologia projetiva	Tamanho da célula de análise	Distância do sensor da geometria	Irradiação Solar Fachada	Unid.	Comparação com controle
Edifício em 0°	Varanda com 2 metros (Variável controle)	1 m ²	10 cm	41,24	KWh/m ²	-
		20 cm ²	10 cm	37,85		8,23 %
		9 cm ²	10 cm	37,81		8,32 %
		1 cm ²	10 cm	Limite processamento do equipamento		
	Varanda com 2 metros (Variável controle)	20 cm ²	8 cm	37,68	KWh/m ²	8,64 %
		20 cm ²	6 cm	37,41		9,28 %
		20 cm ²	4 cm	36,86		10,62 %
		20 cm ²	1 cm	Limite processamento do equipamento		

Fonte: Autores, 2025

3.4 AVALIAÇÃO DAS HIPÓTESES DE VARANDAS E OTIMIZAÇÃO EVOLUTIVA

Para avaliar o impacto das varandas sobre o desempenho térmico foram comparadas seis hipóteses⁵: três configurações na orientação convencional (sem rotação), com varandas de 2 metros (figura 2C), de 1 metro (figura 2B) e sem varanda (figura 2A); e outras três com a edificação otimizada (figuras 2D,E e F), nas mesmas variações de varanda. Essa etapa permitiu verificar a influência direta da projeção das varandas nos ganhos térmicos da fachada.

⁵ As diferentes configurações utilizadas na análise (sem varanda, com varanda de 1 metro e com varanda de 2 metros) foram escolhidas em função de serem soluções usuais adotadas durante o ato projetivo.



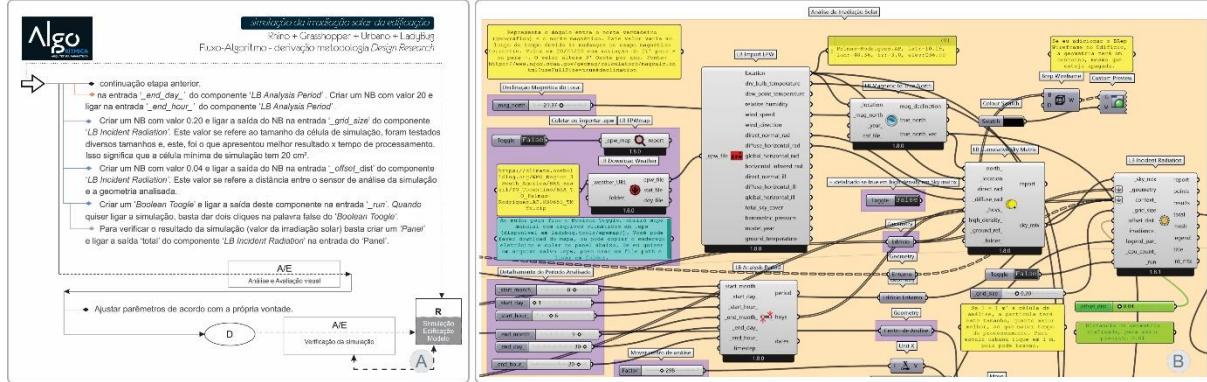
Fonte: Autores, 2025

3.5 FLUXO-ALGORÍTMO COMO MÉTODO DE DOCUMENTAÇÃO DO PROCESSO PROJETUAL

O processo de projeto descrito no Fluxo-Algoritmo (figura 3) de otimização da orientação da edificação modelo utilizado foi realizado utilizando o plugin *HoneyBee* em conjunto com o algoritmo genético do *Galapagos*⁶, com o objetivo de minimizar a incidência de radiação solar nas fachadas.

Devido ao tempo elevado de processamento do modelo completo (com 14 pavimentos, 22 x 22 metros de planta, pé-direito de 3,2 metros e varandas de 2 metros em todas as fachadas) foi criada uma versão simplificada da edificação, sem varandas, exclusivamente para a etapa de otimização da orientação (correspondente ao ângulo de 21°06' em relação ao norte verdadeiro).

Figura 3 – FA e Algoritmo do processo de projeto de simulação.



Fonte: Autores, 2025.

⁶ No *Galapagos*, a saída fitness foi conectada ao valor numérico do componente '*LB Incident Radiation*', que calcula a irradiação total na edificação. Já a entrada *Genome* foi ligada ao componente '*Rotate*', permitindo simular diferentes orientações ao girar a edificação como um todo.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A figura 4 apresenta os resultados da distribuição horária anual de conforto térmico por meio do PMV/PPPD, na qual é possível aferir uma organização dos resultados em matriz horário-mensal (horizonte anual × horas do dia) que seguiu metodologia de mapeamento visual amplamente utilizada em estudos bioclimáticos contemporâneos (CHANG; LEE; WU, 2021, p. 944).

O gráfico resultante representa no eixo horizontal os meses do ano, no eixo vertical as horas do dia; a cor azul representa as condições dentro da zona de conforto PMV e a cor vermelha o desconforto térmico (por calor ou umidade), conforme figura 4.

Figura 4 – Distribuição horária anual de conforto térmico por meio do PMV/PPD sem adoção de estratégia passiva em Palmas/TO.



Fonte: Autores, 2025.

Os resultados apresentados na Figura 4 evidenciam um quadro de elevado desconforto térmico em Palmas-TO na ausência de estratégias passivas no processo de projeto. Entre 90% e 95% das horas analisadas (5h–19h) permanecem fora da faixa de conforto segundo o PMV, com raros períodos confortáveis concentrados entre maio e agosto e majoritariamente nas primeiras horas da manhã. Nos meses de maior carga térmica, especialmente entre setembro e novembro, não há qualquer ocorrência de conforto.

O predomínio da coloração vermelha no gráfico reforça a persistência do desconforto ao longo de todo o ano, indicando a atuação contínua das condições climáticas severas da região. Esses resultados evidenciam a necessidade de incorporar estratégias passivas, tais como controle solar, ventilação natural e proteção da envoltória, desde as primeiras etapas do projeto arquitetônico, a fim de mitigar a carga térmica incidente e melhorar as condições de habitabilidade.

Esse padrão está alinhado com o clima quente e seco característico da região, que apresenta temperaturas frequentemente acima dos níveis considerados aceitáveis para conforto em ambientes naturalmente ventilados.

As manchas azuis, representam as horas confortáveis e aparecem de forma esparsa, concentrando-se principalmente entre final de maio, junho, julho e início de agosto. Esse intervalo

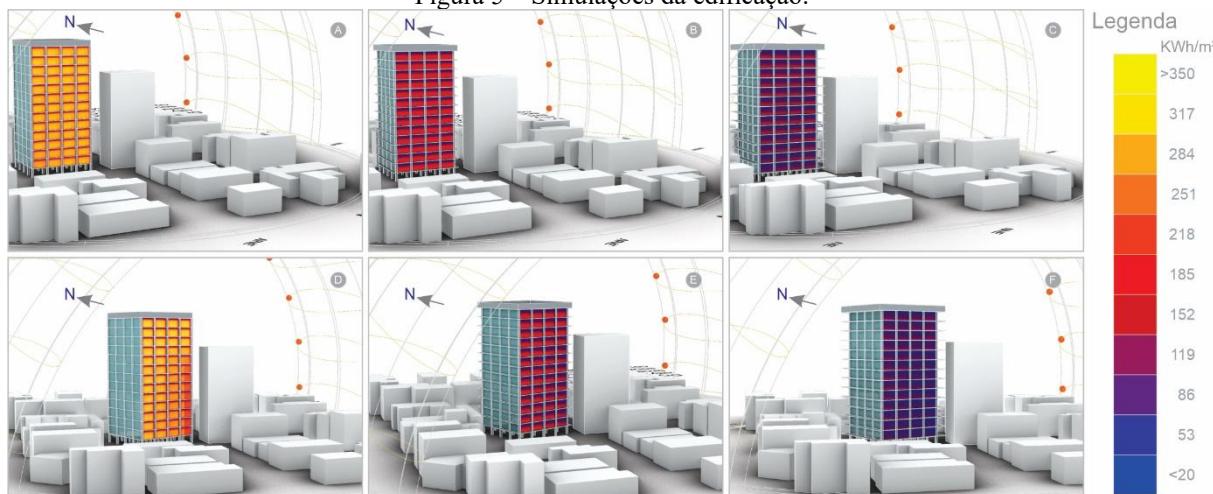
coincide com o período menos quente do ano, quando a temperatura do ar diminui ligeiramente, a umidade relativa tende a cair, há maior amplitude térmica diária.

Mesmo assim, esses momentos de conforto são pontuais e não contínuos ao longo do dia. Observa-se (figura 4) que os instantes de conforto ocorrem mais frequentemente entre 6h e 9h, e em menor intensidade entre 17h e 19h. Isso reforça que durante o período mais quente do dia (11h–17h), o ambiente externo quase nunca entra na zona de conforto. Assim, a radiação solar direta e as altas temperaturas superam os limites fisiológicos definidos pelo PMV.

Entre setembro e novembro, a figura 4 mostra praticamente ausência total de azul, indicando conforto nulo durante todo o período analisado. Esse intervalo coincide com a estação seca com máximas temperaturas anuais e intensificação da radiação solar incidente. Deste modo é possível aferir que a ausência de conforto térmico na maior parte do ano demonstra que os edifícios em Palmas dependem fortemente de estratégias passivas desde as fases iniciais de concepção; uma vez que sem essas estratégias, o ambiente construído está sujeito a desconforto praticamente permanente.

No que tange as simulações da edificação, a figura 5 apresenta três configurações na orientação convencional (sem rotação), com varandas de 2 metros (figura 5C), de 1 metro (figura 5B) e sem varanda (figura 5A); e outras três com a edificação otimizada (figuras 5D,E e F), nas mesmas variações de varanda.

Figura 5 – Simulações da edificação.



Fonte: Autores, 2025

Nela é possível aferir a melhoria de desempenho térmico na fachada otimizada Noroeste. Nota-se que a presença e a dimensão das varandas, atuam como *brises-soleil* impactando diretamente na mitigação dos ganhos térmicos.

Ao observar o quadro 2 com os resultados das simulações de irradiação solar sobre o edifício

é possível aferir que a edificação implantada de forma convencional, sem otimização e sem varandas, apresentou o pior desempenho térmico, com valor de 116,16 kWh/m² na fachada norte.

Quadro 2 – Avaliação de Irradiação Solar sobre o Edifício

Descrição da Simulação		Irradiação Solar Fachada N e NO	Unid.	Redução com variável igualitária	Redução pior caso	Irradiação Solar Total no Edifício	Unid.
Ed. sem otimização	Controle varanda 2 metros	36,86	KWh/m ²	-	68,40 %	926,91	KWh/m ²
	Controle varanda 1 metro	61,59		-	47,20 %	881,35	
	Controle sem varanda (pior caso)	116,65		-	-	882,85	
Ed. Otimizado	Otimizado varanda 2 metros	30,30	KWh/m ²	17,79 %	74,02 %	921,92	KWh/m ²
	Otimizado varanda 1 metro	50,88		17,39 %	56,38 %	876,13	
	Otimizado sem varanda	110,04		5,67 %	5,67 %	887,38	

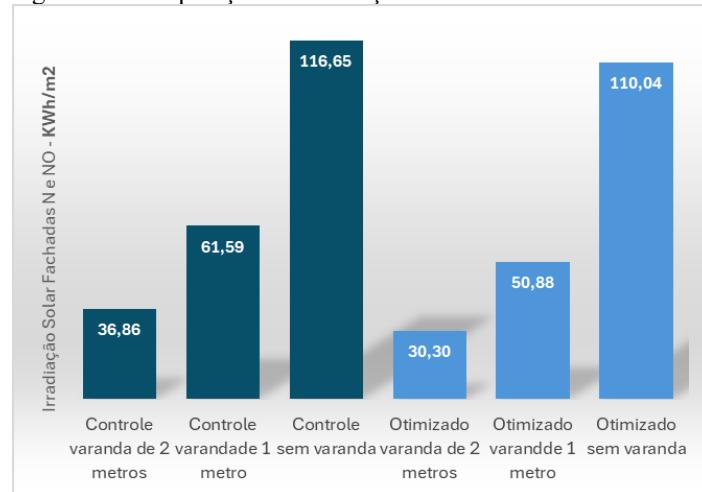
Fonte: Autores, 2025

Os dados apresentados no quadro 2 evidenciam a relação direta entre a ausência de varandas e o aumento da radiação solar incidente, resultando em maior absorção térmica e maior demanda por climatização artificial. Em contrapartida, o edifício com varandas e implantação otimizada obteve uma redução aproximada de 17% na irradiação em relação aos edifícios não otimizados. A comparação entre o pior cenário (sem varanda e sem otimização) e o melhor (com varanda de 2 metros e orientação otimizada) revela uma redução superior a 74% na incidência solar.

A estratégia de sombreamento passivo proporcionada pelas varandas contribui para a melhoria do desempenho térmico da edificação, destacando a relevância do uso de algoritmos evolutivos como ferramenta para encontrar a configuração mais eficiente sob a ótica ambiental e energética.

A figura 6 compara graficamente a incidência solar entre a fachada Norte (do edifício não otimizado) e a fachada Noroeste (mesma fachada após a otimização). Observa-se que a fachada voltada para o Norte, especialmente no período seco e de altas temperaturas de Palmas (agosto e setembro), é mais exposta à radiação solar direta. Essa condição reforça a importância de soluções projetuais voltadas à orientação e à proteção solar da edificação, destacando a importância de estratégias passivas no desempenho térmico.

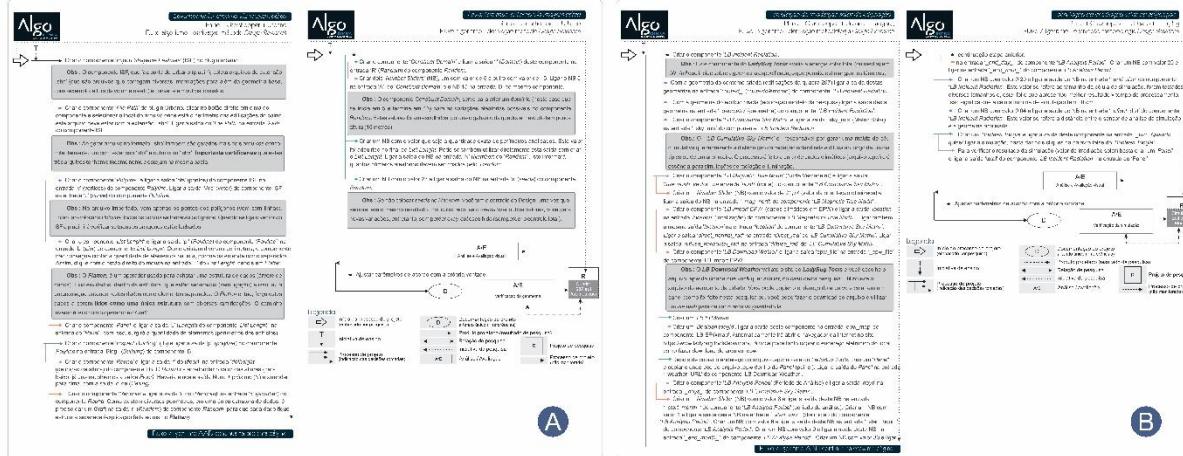
Figura 6 – Comparação da Irradiação Solar nas Fachadas N e NO.



Fonte: Autores, 2025

Quanto à discussão sobre o processo de projeto da pesquisa foram produzidos os Fluxo-Algoritmos (FA's) presentes na figura 6, na qual é possível observar todos os passos tomados para o desenvolvimento da simulação computacional, tanto do levantamento do entorno da quadra analisada, via imagem aérea (figura 7) quanto da simulação da irradiação solar na edificação (figura 7B).

Figura 7 – Fluxo-algoritmos dos processos de projeto para a simulação da pesquisa.



Fonte: Autores, 2025

Vale ressaltar que, para o estudo metodológico do processo de projeto e, principalmente, para a compreensão dos componentes utilizados, as caixas de observação (caixas cinzas nos FA's) foram relatadas, pelos pesquisadores, como de extrema importância, principalmente para os usuários com pouca ou nenhuma experiência com o software computacional utilizado.

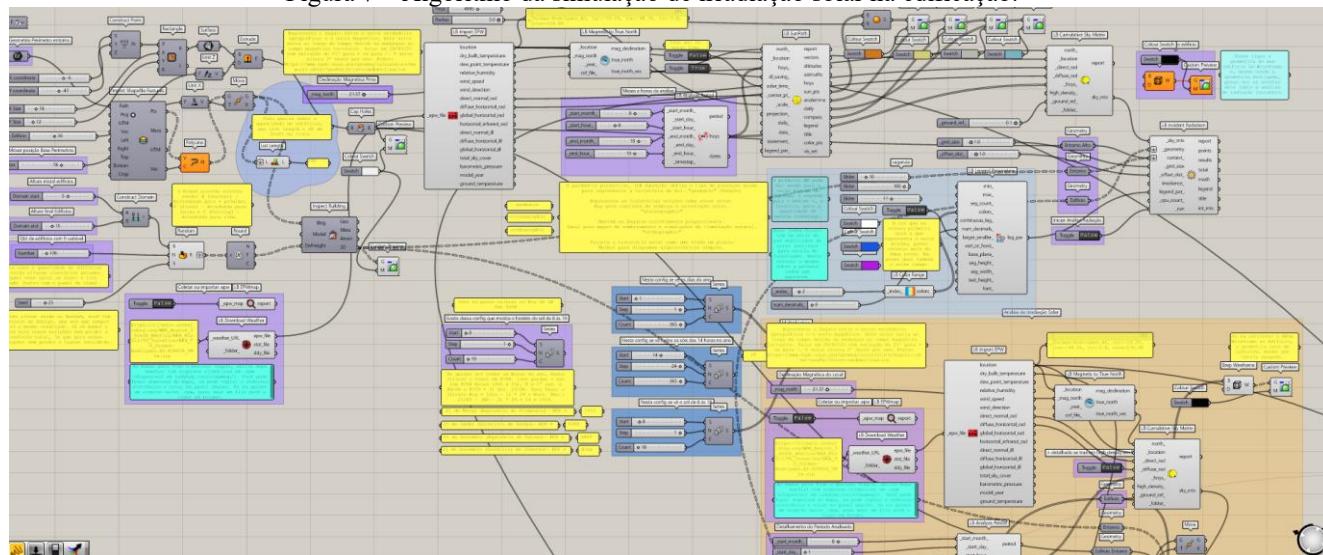
Sobre o exposto, um dos participantes da pesquisa relatou que, ao pesquisar para construir a caixa de explicação, ele conseguiu compreender melhor a própria tomada de decisão durante o ato

projetivo.

Outro aspecto notado durante o estudo do método e, comparando um processo FA com o outro é que, o limite da compreensão mental do processo de projeto (lembra todos os passos tomados desde o início de construção do algoritmo) se relaciona com o limite da capacidade humana de reter essa concatenação de passos, com isso, processos de projeto (ou fluxos-algoritmos destes processos) tornam-se difíceis de serem relembrados após uma quantidade maior de passos tomadas (a pesquisa não quantificou qual seria esse limite, ficando essa discussão para uma pesquisa futura).

Mesmo com esta característica observada sobre o limite que a capacidade humana tem de recordar todos os passos tomados no processo de projeto desde o início do ato projetivo, a pesquisa pôde perceber que ainda assim, utilizar o Fluxo-Algoritmo no processo de projeto organiza melhor a tomada de decisões do projeto, facilitando uma revisitação futura das ações tomadas quando comparado com o próprio algoritmo do processo fornecido pelo software (figura 8).

Figura 7 – Algoritmo da simulação de irradiação solar na edificação.



Fonte: Autores, 2025

5 CONCLUSÕES

Os resultados desta pesquisa demonstram o potencial transformador da integração entre modelagem paramétrica, simulação ambiental e algoritmos evolutivos no processo de concepção arquitetônica. A aplicação combinada do Grasshopper, LadyBug, HoneyBee e do algoritmo genético Galapagos revelou-se uma estratégia metodológica capaz de ampliar substancialmente a capacidade analítica do projetista, permitindo que decisões morfológicas e orientações formais sejam orientadas por critérios de desempenho ambiental rigorosamente quantificados.

A incorporação do Fluxo-Algoritmo (FA) como instrumento de documentação projetual configura-se como uma contribuição metodológica expressiva. Diferentemente dos métodos tradicionais de otimização, que usualmente privilegiam os resultados finais em detrimento do processo, o FA oferece um registro transparente e replicável das relações entre variáveis, dependências lógicas e ciclos iterativos de decisão. Essa rastreabilidade qualifica o processo projetual e o aproxima de um paradigma científico-experimental, em que hipóteses, procedimentos e resultados se articulam de maneira verificável.

Do ponto de vista do desempenho, os achados revelam que a presença de varandas exerce papel determinante na mitigação da carga térmica incidente, sobretudo em fachadas expostas às condições severas do clima de Palmas–TO. A redução superior a 74% da irradiação solar nos cenários otimizados evidencia que varandas e beirais podem, quando parametrizados e avaliados computacionalmente, atuar como dispositivos de regulação térmica de alta relevância. No entanto, os resultados também demonstram que a simples presença de varandas não é suficiente: sua eficácia depende da orientação, profundidade, disposição espacial e relação com a geometria global da edificação.

A otimização da orientação do edifício por meio do Galapagos revelou que pequenas variações angulares podem produzir impactos significativos no desempenho térmico, sobretudo em regiões onde a trajetória solar anual apresenta variações críticas entre períodos secos e chuvosos. Esse achado reforça a necessidade de incorporar estratégias de otimização desde as fases iniciais do projeto, quando decisões de implantação ainda têm baixo custo de modificação.

Finalmente, esta investigação destaca que a mediação computacional não substitui o papel do arquiteto, mas o expande. Ao articular parametrização, simulação e algoritmos evolutivos, o projetista passa a operar em um campo ampliado, no qual é possível explorar um maior número de soluções formais, avaliar cenários complexos e justificar decisões com base em evidências quantificáveis. Assim, a pesquisa contribui para consolidar uma prática projetual mais responsável, sustentável e epistemologicamente sólida, alinhada ao paradigma contemporâneo de arquitetura orientada por desempenho.

AGRADECIMENTOS

Ao CNPq, à Fundação de Amparo à Pesquisa do Tocantins e à Universidade Federal do Tocantins pelo apoio recebido (iniciação científica); ao Laboratório de Conforto Ambiental (LabCon) da Universidade Federal do Tocantins pela cessão do espaço para os encontros do grupo de pesquisa.

REFERÊNCIAS

ABNT ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16636: Serviços de Projeto de Arquitetura e Engenharia. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

BARBOSA, P. G.; AGUILAR, M. T. P.; SALES, R. Conforto térmico do ambiente construído, eficiência energética e difusividade térmica: um estudo interdisciplinar que envolve o Design. Pensamentos em Design, [S. l.], v. 1, n. 1, p. 95–102, 2021. DOI: 10.36704/pensemdes.v1i1.5914. Disponível em: <https://revista.uemg.br/index.php/pensemdes/article/view/5914>. Acesso em: 8 abr. 2025.

BENEVOLO, L. História da Arquitetura Moderna. São Paulo: Perspectiva, 1993.

CHANG, Y.; LEE, P.; WU, T. Outdoor thermal comfort mapping using parametric simulation and environmental modeling. Building and Environment, v. 204, p. 937–952, 2021.

DEB, K. Multi-Objective Optimization using Evolutionary Algorithms. Chichester: John Wiley & Sons, 2001.

Duarte, A.; TOLBA, O.; EZZELDIN, S. Design Optimization of Open Office Building Form for Thermal Energy Performance using Genetic Algorithm. Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal, v. 6, n. 2, p. 254–261, 2021. Disponível em: <https://www.astesj.com/v06/i02/p28/>. Acesso em: 15 Jul. 2025.

EIBEN, A. E.; SMITH, J. E. Introduction to Evolutionary Computing. Springer, 2003.

FANGER, P. O. Thermal Comfort: Analysis and Applications in Environmental Engineering. New York: McGraw-Hill, 1970.

FROTA, A. B.; SCHIFFER, S. R. Manual de conforto térmico: arquitetura bioclimática. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2001.

GIVONI, B. Climate Considerations in Building and Urban Design. New York: John Wiley & Sons, 1998.

GOMEZ, L. M.; CARLESSO, R.; VIEIRA, W. L.; DA SILVA, L. C. Energia solar no meio ambiente: fundamentos e aplicações. Revista Brasileira de Energia Renovável, v. 7, n. 1, p. 281–301, 2018. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/rber>. Acesso em: 08 abr. 2025.

ISO 7730. Ergonomics of the Thermal Environment — Analytical determination and interpretation of PMV and PPD indices. 2005.

MACHADO, J. C.; LEITÃO, A. Performance-Driven Architectural Design: A Process-Oriented Approach. Design Studies, v. 41, p. 53-69, 2015.

MENEZES, R. A.; SILVA, M. R. Utilização do plugin Galapagos para otimização de projetos arquitetônicos visando o desempenho ambiental. In: Anais do XVII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. Porto Alegre: ANTAC, 2020.

MITCHELL, M. An Introduction to Genetic Algorithms. Cambridge: MIT Press, 1996.

MOHSENZADEH, M.; MARZBALI, M. H.; TILAKI, M. J. M.; ABDULLAH, A. Building form and energy efficiency in tropical climates: A case study of Penang, Malaysia. Urbe, Revista Brasileira de Gestão Urbana, v. 13. 2021. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/urbe/a/8C7bWbYMFndzrdNdm4W74YB/>. Acesso em: 15 Jul. 2025.

OLGYAY, V. Design With Climate: Bioclimatic Approach to Architectural Regionalism. Princeton: Princeton University Press, 1963.

OMENA, T. H. Ciclo de desenvolvimento de projeto baseado em desempenho do material: dos processos digitalmente mediados à fabricação local. 2019. 270 p. Tese (doutorado em Arquitetura e Urbanismo) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo – USP, São Paulo, 2019.

PORTE, F. Projeto de Arquitetura: princípios e práticas. São Paulo: Gustavo Gili, 2013.

ROUDSARI, M.; PAK, M. Ladybug: A plugin for environmental analysis in Grasshopper. In: Proceedings of BS 2013: 13th Conference of the International Building Performance Simulation Association, p. 679–688, 2013.

SZOKOLAY, S. Introduction to Architectural Science: The Basis of Sustainable Design. Oxford: Elsevier, 2008.