

PROJETO GENERATIVO DE SISTEMA DE COBERTURAS PARA ESPAÇOS LIVRES PÚBLICOS

PROYECTO GENERATIVO DE SISTEMA DE CUBIERTAS PARA ESPACIOS LIBRES PÚBLICOS

GENERATIVE DESIGN OF ROOFING SYSTEMS FOR PUBLIC OPEN SPACES

SANTOS, EDLER OLIVEIRA

Mestre em Arquitetura e Urbanismo, docente na Universidade Federal de Alagoas (UFAL), edler.santos@arapiraca.ufal.br

RESUMO

Os *campi* universitários brasileiros se configuram como aglomerados de blocos conectados por áreas externas de uso público. Esses espaços são comumente subutilizados porque não possuem condições físicas adequadas à permanência e deslocamentos diários. Concorrem para a subutilização problemas como ausência de mobiliário e elementos de sombreamento, sobretudo em períodos de tempo quente e seco. O objetivo geral deste artigo é sistematizar o desenvolvimento de um projeto generativo de sistema de coberturas a ser implementado no redesenho dos ambientes externos de *campi* universitários. Demandas reais de um contexto específico foram utilizadas para modelar um artefato formado por módulos replicados com estrutura em Madeira Laminada Colada (MLC) e coberta em painéis de Material Composto de Alumínio (ACM). O projeto foi orientado por processo generativo baseado em desempenho, desenvolvido na interface Rhinoceros/Grasshopper, e utilizou as operações de busca e otimização do algoritmo genético Galapagos. As soluções geradas possuem o melhor desempenho na relação entre a máxima área de sombreamento e o mínimo uso de material. A configuração geométrica indica que o artefato pode ser replicado em várias situações devido ao potencial de expansão e adaptação do sistema modular. No entanto, a variação geométrica restrita sugere uma limitação do modelo que poderia ser superada com o desenvolvimento de conexões topológicas mais sofisticadas, que possibilitem a emergência de soluções. Os resultados alcançados com a pesquisa (o modelo, a sistematização do processo de elaboração do modelo e a crítica ao modelo desenvolvido) podem orientar decisões de projeto em contextos similares.

PALAVRAS-CHAVE: projeto generativo; projeto baseado no desempenho; processo evolutivo; simulação solar; construção modular.

RESUMEN

Los campus universitarios brasileños se caracterizan por ser conglomerados de bloques conectados por áreas públicas externas. Estos espacios, a menudo, están subutilizados debido a la falta de condiciones físicas adecuadas para la permanencia y los desplazamientos diarios. La subutilización se atribuye a problemas como la ausencia de mobiliario y elementos de sombreado, especialmente durante períodos cálidos. El objetivo general de este artículo es sistematizar el desarrollo de un proyecto generativo de un sistema de cubiertas para ser implementado en el rediseño de los ambientes exteriores en universidades. Se utilizaron demandas reales de un contexto específico para modelar un artefacto compuesto por módulos replicados con estructura de madera laminada encolada (MLC) y cubierta de paneles de Aluminium Composite Material (ACM). El proyecto fue guiado por un proceso generativo basado en el rendimiento, desarrollado en la interfaz Rhinoceros/Grasshopper, y empleó las operaciones de búsqueda y optimización del algoritmo genético Galapagos. Las soluciones generadas presentan el mejor rendimiento en la relación entre la máxima área de sombreado y el mínimo uso de material. La configuración geométrica indica que el artefacto puede ser replicado en diversas situaciones debido al potencial de expansión y adaptación del sistema modular. Sin embargo, la variación geométrica restringida sugiere una limitación del modelo que podría superarse con el desarrollo de conexiones topológicas más sofisticadas, que posibiliten la emergencia de soluciones. Los resultados alcanzados con la investigación (el modelo, la sistematización del proceso de elaboración del modelo y la crítica al modelo) pueden orientar decisiones de proyecto en contextos similares.

PALABRAS-CLAVES: proyecto generativo; proyecto basado en el rendimiento; proceso evolutivo; simulación solar; construcción modular.

ABSTRACT

Brazilian university campuses are configured as clusters of blocks connected by external areas for public use. These spaces are often underutilized because they lack adequate physical conditions for daily permanence and movement. Problems such as the absence of furniture and shading elements, especially during hot and dry periods, contribute to this underutilization. This article aims to systematize the development of a generative design for a roofing system to be implemented in the redesign of university campus external environments. Real demands from a specific context were used to model an artifact composed of replicated modules with a glued laminated timber (GLT) structure and covered with Aluminum Composite Material (ACM) panels. The design was guided by a performance-based generative process, developed in the Rhinoceros/Grasshopper interface, and utilized the search and optimization operations of the genetic algorithm Galapagos. The generated solutions exhibit the best performance in the relationship between the maximum shading area and the minimum use of material. The geometric configuration indicates that the artifact can be replicated in various situations due to the expansion and adaptation potential of the modular system. However, the restricted geometric variation suggests a limitation of the model that could be overcome with the development of more sophisticated topological connections, which would enable the emergence of solutions. The results achieved with the research (the model, the systematization of the model development process, and the critique of the developed model) can guide design decisions in similar contexts.

KEYWORDS: generative design; performance-based design; evolutionary process; solar simulations; modular construction.

Recebido em: 06/02/2025

Aceito em: 21/08/2025

1 INTRODUÇÃO

Os *campi* universitários brasileiros configuram-se como conjuntos de edifícios conectados por áreas públicas externas, que são comumente subutilizadas devido às condições físicas inadequadas para permanência e para deslocamentos diários. Essa subutilização é agravada pela ausência de mobiliário, de elementos de sombreamento e de proteção contra intempéries, tanto na estação quente e seca quanto nos períodos de chuva.

A pesquisa de soluções para esse problema torna-se necessária, uma vez que as condições atuais podem impedir a apropriação dos ambientes universitários. Os espaços atualmente subutilizados, acessíveis aos professores e estudantes, e à comunidade externa, poderiam ser aproveitados para atividades cotidianas como aulas ao ar livre, eventos e encontros de diversas naturezas, promovendo o convívio social e a integração da comunidade acadêmica. Assim, desponta a seguinte questão: Como obter uma solução arquitetônica ótima para melhoria da qualidade ambiental dos espaços públicos em universidades, incentivando seu uso ativo?

Diante disso, o objetivo geral é sistematizar as etapas do projeto generativo de um sistema de coberturas a ser implementado no redesenho de ambientes externos em universidades. O objetivo específico é avaliar o desempenho do artefato na convergência entre as soluções formais, funcionais e ambientais. Para tanto, as demandas reais do contexto vivenciado pelo autor foram utilizadas como campo de experimentação.

A Design Science Research (DSR) foi adotada como metodologia devido a sua aplicabilidade em pesquisas que preveem o projeto, a construção e a avaliação de artefatos (Dresch, Lacerda, Antunes Júnior, 2015, p. 6). A sistematização do experimento (e a estrutura do artigo) foi orientada pelas três fases gerais desse método: formulação do problema, que envolve a identificação de demandas do contexto; desenvolvimento do projeto, que envolve a elaboração e avaliação do artefato; e a generalização dos resultados obtidos no experimento para uma classe de problemas semelhantes.

Assim, o artigo inicia com a apresentação do conceito de projeto baseado no desempenho (*performance-based design*), extraída dos textos seminais de Yehuda Kalay (1999) e Rivka Oxman (2006, 2007, 2008, 2009). Em seguida, apresenta as tarefas executadas e as decisões tomadas no processo de projeto para a obtenção do modelo paramétrico/generativo, considerando as etapas previstas na DSR.

2 GERAÇÃO BASEADA NO DESEMPENHO

Em seu artigo seminal *Theory and design in the first digital age*, Oxman (2006) propõe uma taxonomia que engloba cinco modelos de design digital: os modelos CAD, os modelos de formação, os modelos generativos, os modelos de desempenho e os modelos compostos integrados. As diferenças na metodologia de projeto que definem esses modelos são estabelecidas pelo modo como o projetista interage com as atividades de representação, geração, avaliação e análise de desempenho durante o processo de projeto.

No modelo generativo, a forma não resulta do desenho da geometria, mas da manipulação de parâmetros e dados diversos (numéricos, geométricos etc.) por meio de algoritmos. A elaboração desses modelos depende, antes de tudo, da modelagem paramétrica dos artefatos, que define sequências de passos finitos para a geração de geometrias (Jabi, 2013; Florio, 2016). Os parâmetros estabelecem as propriedades geométricas e as regras de associação entre as partes, enquanto as variáveis definem os domínios numéricos de variação dessas propriedades.

Nesse sentido, o projetista interage explicitamente com o mecanismo que gera a forma e com a representação geométrica resultante da programação algorítmica (Oxman, 2006), como ocorre na interface interativa do *software* Rhinoceros e do *plugin* Grasshopper. Assim como no modelo generativo, o modelo baseado no desempenho se caracteriza pela interação explícita do projetista com o mecanismo e com a representação geométrica dele derivada, mas essa interação se amplia a partir da consideração do desempenho em diversas instâncias. Na prática, o limite entre esses modelos se torna tênue uma vez que o projeto/modelo baseado no desempenho utiliza operações generativas em seu processo de busca de soluções.

O desempenho pode ser compreendido como uma medida de avaliação do comportamento de artefatos na convergência entre forma, função e contexto (Kalay, 1999). Nessa perspectiva, projetos são bem-sucedidos quando possuem uma forma que atende às necessidades funcionais específicas de um dado contexto. Todavia, não há uma relação de causalidade entre esses três aspectos, visto que:

O projeto baseado em desempenho reconhece que formas diversas podem alcançar funções similares de maneira bem-sucedida, e que funções diferentes muitas vezes podem ser viabilizadas por formas semelhantes. Adicionalmente, esse tipo de projeto leva em conta as variações de desempenho das mesmas combinações de forma e função em contextos distintos (Kalay, 1999, p. 396, tradução livre)¹.

Essa afirmação elucida aspectos importantes que devem participar da avaliação de desempenho de artefatos projetados em diversas escalas. Além desses, é fundamental considerar a maneira como a *performance* pode estruturar o processo de design. Oxman (2008) aponta dois métodos distintos de *performance-based design*. No método analítico, o artefato é gerado e em seguida avaliado. Nesse caso, “é o designer humano quem adapta o modelo de design geométrico com o objetivo de acomodar resultados avaliados e otimizados” (Oxman, 2008, p.5, tradução livre)². Enquanto no método generativo, o artefato é gerado pelos resultados da otimização, por meio de um processo recursivo que integra a geração, avaliação e modificação segundo critérios de desempenho pré-definidos.

O projeto baseado em desempenho é redefinido como a capacidade de manipular diretamente as propriedades geométricas de um modelo digital a partir de análises de desempenho, com o objetivo de otimizá-lo. Em vez de analisar o desempenho de um projeto e, então, modificá-lo conforme necessário, pode ser possível, em última análise, informar, gerar e modificar o modelo de design diretamente, utilizando simulações baseadas em desempenho (Oxman, 2006, p.5, tradução livre)³.

A implementação desse método depende da definição de geometrias associativas, que mantêm os encadeamentos topológicos ao mesmo tempo em que permite modificações. Isso significa que as propriedades geométricas de associação entre as partes dos artefatos são mantidas enquanto sua forma pode sofrer modificações a partir da variação de parâmetros (Sperling, 2016). Essas transformações são essenciais no processo de busca e emergência de soluções ótimas com desempenho adequado em diversos aspectos, tais como: ambientais, termo energéticos, estruturais, financeiros etc. (Martino, 2015).

As medidas de avaliação de desempenho, operacionalizadas por algoritmos específicos, são utilizadas para gerar soluções otimizadas durante o processo de projeto, a partir de modificações e ajustes na concepção geométrica inicial. Assim, este artigo se interessa em explorar as possibilidades de uso integrado de ferramentas de geração e avaliação de desempenho de artefatos arquitetônicos.

Ferramentas de geração e avaliação de desempenho

As ferramentas generativas podem ser utilizadas em três situações distintas: 1. no processo de otimização de soluções, por meio de testes e simulações de desempenho (ambiental, estrutural, financeiro etc.) de modo a avaliar e encontrar a melhor alternativa; 2. na geração automatizada de famílias de artefatos a partir de um conjunto de regras previamente definidas, que culminam na emergência de soluções diversas (a gramática da forma se enquadra nessa situação ao gerar soluções por meio de operações gráficas como espelhamento, sobreposição, rotação etc.); 3. na exploração criativa de soluções, que não parte da definição apriorística de regras e/ou características específicas de artefatos, mas sim de parâmetros que potencializam a geração de soluções originais (Celani, Vaz, Pupo, 2013).

Os algoritmos genéticos (AGs) são ferramentas que se enquadram nessa última situação, ao explorar soluções ótimas no âmbito de processos evolutivos, fazendo parte do paradigma biológico na arquitetura contemporânea (Chu, 2013). Ou seja, a busca de soluções otimizadas ocorre por meio de operações inspiradas na biologia evolutiva, tais como: a mutação, o cruzamento e a seleção (Bentley, 1999; Varela, 2013; Martino, 2015). Nesse âmbito, os ciclos de geração de soluções se repetem de modo que “ao final do processo evolutivo, espera-se que a melhor concepção seja encontrada e, muitas vezes essas soluções são contraintuitivas, exequíveis, mas não imaginadas pelos projetistas” (Lemonge, 2016, p. 25).

Os algoritmos genéticos ou evolutivos possuem mecanismos específicos de geração baseada no desempenho. O Galapagos é um dos AGs mais utilizados em experimentos de projeto paramétrico porque a interface amigável do *software* Rhinoceros e do *plugin* Grasshopper, onde esse AG atua, permite a programação visual algorítmica por não programadores, incluindo arquitetos e designers (Rutten, 2010).

O Galapagos possui dois *inputs*: o genoma ou coleção de genes (*genome*) – definido pelas variáveis e seus respectivos parâmetros de projeto – e a função de aptidão (*fitness fuction*). A *fitness fuction* corresponde a uma razão matemática que serve como medida de avaliação de desempenho das soluções obtidas no

processo de busca. Nessa equação, que equivale a uma operação matemática de divisão, o numerador corresponde à variável a ser minimizada e o denominador corresponde à variável a ser maximizada. Por exemplo, ao buscar as melhores soluções de dimensionamento de esquadrias para obtenção de conforto em um determinado ambiente, a função de aptidão poderia ser definida pela razão da incidência solar mínima sobre a máxima abertura para aproveitamento da ventilação natural. O resultado dessa divisão é o valor de limiar (*threshold*) que guia o projetista na escolha objetiva das soluções obtidas pelos AGs. No exemplo citado, quanto menor for o valor de limiar, mais o artefato estará apto a solucionar o problema de projeto em questão. Contudo, essa análise quantitativa não dispensa a análise qualitativa e subjetiva das soluções indicadas como as melhores dentro de um dado conjunto de soluções (Rutten, 2010).

A partir dos resultados dos experimentos com AGs realizados em sua pesquisa, Martino (2015) afirma que a exploração criativa e a otimização de soluções podem participar do mesmo processo de projeto, a depender da postura assumida pelo projetista. Sobre isso, ele afirma que o processo de exploração criativa acontecerá quando a intenção de obter a solução mais bem adaptada, ou a solução ótima, não suplantará a possibilidade de se obter diversas soluções aptas a solucionar o problema de projeto abordado.

Se os critérios adotados dependem exclusivamente dos algoritmos evolutivos para a sua solução, não importando a diversidade, mas a solução melhor adaptada, é possível afirmar que o aspecto de otimização é o principal. Caso contrário, se a ênfase for a obtenção de diversidade, o caráter exploratório é assumido, pois o projetista irá escolher no campo de soluções aquela que melhor satisfaz aos seus critérios, que podem ser subjetivos. Assim, a utilização de um método de otimização não necessariamente restringe ou limita o processo de projeto, mas cria uma oportunidade de exploração e identificação de possíveis soluções através da relação de parceria com a ferramenta digital (Martino, 2015, p. 232).

Essa hipótese, confirmada pelos resultados da pesquisa de Martino (2015), desfaz os limites entre os modelos de geração e os modelos baseados no desempenho. Ao mesmo tempo, ratifica o pensamento de Oxman (2008) ao discutir o uso dos AGs enquanto ferramentas que possuem o duplo potencial de avaliação e geração simultânea de artefatos de diversas naturezas.

Essas características tornam possível a pesquisa e a emergência de soluções não antevistas antes do início da atividade de projeto, assim como permitem a automação do processo e a eficiência na busca de soluções ótimas. Contudo, isso não exclui a participação do projetista nas tomadas de decisão sobre as soluções mais adequadas geradas pelo modelo paramétrico, que devem ser avaliadas pelo seu *background* de conhecimentos.

3 PROCESSO DE PROJETO

Devido à escolha metodológica já mencionada, esta seção do artigo foi estruturada em três partes: a formulação do problema, o desenvolvimento do projeto e a discussão dos resultados. Considera-se que o processo começou com a escolha do contexto de intervenção (e a respectiva identificação de parâmetros e condicionantes de projeto) e finalizou com a geração de um artefato (um sistema de coberturas) em sua versão preliminar.

Formulação do problema

O problema de pesquisa foi identificado no contexto da sede do Campus UFAL Arapiraca, campus de interiorização fundado em 2006 em Arapiraca, a segunda maior cidade do estado de Alagoas. A vivência cotidiana elucidou um problema relacionado à falta de conforto dos usuários nas atividades de passagem e de permanência realizadas diariamente. Isso ocorre devido à exposição excessiva ao sol, causada pela escassez de arborização, o que provoca desconforto nos deslocamentos e impede o uso prolongado dos ambientes externos entre os edifícios.

O Plano Diretor do campus, elaborado pelo curso de Arquitetura e Urbanismo no ano de 2012, identificou e documentou a existência desse problema, além de apontar diretrizes e prazos para ações de melhoria. Nas diretrizes relacionadas a infraestrutura, serviços urbanos e instalações físicas, foram apontadas as seguintes ações: “arborizar os espaços físicos do Campus de forma intensiva e melhorar o tratamento paisagístico” (UFAL, 2012, p.8) e “criar espaços destinados à convivência e à integração social da comunidade acadêmica” (UFAL, 2012, p.10). Essas melhorias, consideradas de curto prazo, tinham execução prevista para 2016. No entanto, nos últimos anos, não houve ações efetivas da gestão local nesse sentido.

Os blocos de edifícios são conectados por dois eixos de circulação: um transversal, definido pela marquise de concreto que começa no Bloco das Coordenações, atravessa o pátio central e termina no Bloco B de Ensino; e um longitudinal, que começa no corredor central do Bloco B e atravessa os blocos B2 e C em direção à área de intervenção. Como o eixo longitudinal é interrompido pelo Núcleo de Ciências Exatas (NCEX), o acesso ao Restaurante Universitário (RU) ocorre pelo caminho entre o núcleo e o Bloco de Laboratórios, que se conecta à via perimetral onde veículos de pequeno e médio porte circulam (Figura 1).

O recorte escolhido é o mais crítico porque não possui elementos suficientes (naturais ou artificiais) que garantam a proteção e o conforto das pessoas no caminho até o restaurante. Essa área apresenta um espaço com potencial de uso, com uma área livre de aproximadamente 1500 m² de solo exposto (incluindo porções de forração vegetal), delimitado pelos blocos B2 e C e pelo NCEX. Essa área livre se prolonga no Percurso 1, que possui 54 metros de comprimento e 6 m de largura, e é interrompido pela via perimetral que dá acesso ao RU. No lado oposto da via perimetral, estão os percursos 2 e 3, que medem, respectivamente, 26 e 42 metros de comprimento e dão acesso direto ao RU. Esses percursos são pavimentados em concreto armado e possuem largura mínima de 1,50 m. Esse conjunto de espaços foi escolhido como recorte de intervenção devido ao uso frequente, apesar das condições desfavoráveis (Figura 1).

Figura 1: Contexto de intervenção.



Fonte: Adaptado do Google Maps pelo autor, 2025.

Para que o artefato projetado solucione o problema de forma otimizada, algumas restrições e requisitos devem ser atendidos de maneira integrada. As restrições impostas pelo contexto que mais condicionaram o desenvolvimento do projeto foram: as dimensões da área livre, as distâncias entre as edificações vizinhas e a circulação de veículos de pequeno e médio porte na via perimetral, incluindo os caminhões VUC (Veículos Urbanos de Carga) que transportam os insumos alimentares até o RU.

Os principais requisitos a serem atendidos, definidos pelo projetista/usuário do espaço, são: o conforto das pessoas, a diversificação de uso do lugar e a economia de recursos financeiros.

A promoção de usos diversos está condicionada à concepção de espaços confortáveis e adequados à permanência prolongada. Assim, a elaboração de soluções que priorizem o conforto ambiental deve partir do entendimento das características do clima local e das estratégias bioclimáticas recomendadas pela literatura especializada no tema.

O artefato será desenvolvido para a cidade Arapiraca, localizada no agreste do estado Alagoas, na porção central do território. Essa posição geográfica corresponde a uma região de transição entre a zona costeira úmida e o semiárido do Nordeste brasileiro. Climaticamente, a cidade apresenta dois períodos distintos: o quente e seco (outubro a abril), com os maiores valores médios mensais de temperatura do ar e predominância do vento leste; e o quente e úmido (maio a setembro), com os menores valores médios nessa variável e maior incidência do vento sudeste (Torres, 2017).

Durante o período de medição de 2009 a 2015, a maior média de temperatura do ar foi de 27,84 °C em novembro, e a menor média foi de 21,64 °C em agosto. Em relação aos valores da umidade relativa do ar, a menor média foi de 69,8% em novembro e a maior média foi de 86,4% em julho, para o mesmo período.

indicado⁴. Quanto à pluviosidade, a cidade apresenta um padrão irregular, caracterizado pela concentração de chuvas nos meses de maio, junho e julho (período quente e úmido) e por menores índices de precipitação em novembro, dezembro, janeiro e fevereiro (período quente e seco) (Torres, 2017).

Considerando essas características da cidade Arapiraca, as estratégias bioclimáticas indicadas por Silva (2019) para adequar a arquitetura ao clima local são: sombreamento permanente em toda a edificação, evitando afetar a iluminação e os fluxos de vento; ventilação diurna durante todo o ano; inserção de aberturas medianas nas paredes (quando houver); e resfriamento evaporativo por meio de vegetação e umidificação ajustável do ar.

Essas estratégias serão contempladas no projeto do artefato, exceto a inserção (dispensável) de aberturas, uma vez que o sistema de coberturas dispensa o uso de elementos de vedação externa. Além disso, soluções para o resfriamento evaporativo podem ser atendidas no projeto com a previsão de espaços destinados a inserção de vegetação, estando sujeitas às ações efetivas da gestão do campus observando as diretrizes do Plano Diretor (UFAL, 2012).

Assim, justifica-se a necessidade e urgência de projetar um artefato que proporcione o sombreamento permanente da área livre e dos percursos já indicados e seja permeável aos ventos predominantes na cidade, sobretudo no período quente e seco, quando o clima não é ameno. Os elementos de proteção solar do sistema de coberturas, portanto, servirão também como abrigo em dias de chuva ao longo do ano.

A economia de recursos deve ser obtida com a adoção de um sistema construtivo industrializado que possibilite uma construção a seco e não demande altos gastos de manutenção. O uso diversificado relacionado à área livre deve priorizar as várias atividades já previstas no Plano Diretor (sem restringir por meio de um programa de necessidades rígido), tais como locais para descanso, permanência e atividades recreativas (UFAL, 2012).

Existem soluções previstas nesse documento que extrapolam o escopo do projeto desenvolvido neste artigo, como praças, bosques e parques equipados com mobiliário e arborização. Contudo, o artefato projetado pode representar a intervenção inicial para um sistema de espaços livres com qualidade ambiental destinado ao uso ativo da comunidade acadêmica (UFAL, 2012).

Desenvolvimento do projeto – Etapa 1: elaboração do modelo paramétrico

A fim de proporcionar conforto e proteção aos usuários, foi projetado um sistema de coberturas implantado sobre a área livre e os percursos que levam até o RU. Esta etapa foi orientada pela seguinte estratégia:

- 1. Antes da modelagem paramétrica:**
 - a. Escolha dos materiais e definição da geometria/forma dos módulos de cobertura;
 - b. Definição dos parâmetros e variáveis dimensionais a partir dos dados do contexto.
- 2. Durante a modelagem paramétrica (*software* Rhinoceros/Grasshopper):**
 - c. Definição da geometria a partir de um *grid* triangular, havendo replicação dos módulos nos eixos x e y;
 - d. Simulação das horas de sol e sombra, usando a carta solar elaborada pelo *add on* LadyBug Tools;
 - e. Elaboração do modelo estrutural, usando o modelo de montagem do *add on* Karamba 3D;
 - f. Geração de soluções baseadas no desempenho, usando o algoritmo genético Galapagos.

A concepção da forma foi orientada pelo limite irregular da área de intervenção (Figura 1). Assim, foi projetado um módulo de cobertura em formato de pilar-árvore, com tronco e copa formados por barras de seção reta. Esse módulo pode ser replicado livremente, assumindo diversas possibilidades de ocupação do território. Para a estrutura e a cobertura, foram escolhidos os seguintes materiais: madeira laminada colada (MLC) de eucalipto reflorestado e painéis de alumínio composto (ACM) com acabamento superficial uniforme.

A MLC de eucalipto reflorestado⁵ consiste em um “produto estrutural, formado por associação de lâminas de madeira selecionada, coladas com adesivos e sob pressão” (Pfeil, Pfeil, 2003, p. 13). Por consistir em uma madeira engenheirada, a MLC apresenta as seguintes vantagens e desvantagens em relação à madeira maciça (Pfeil, Pfeil, 2003, p. 14):

- a) permite a confecção de peças de grandes dimensões (as dimensões comerciais de madeira serrada são limitadas);

- b) permite melhor controle de umidade das lâminas, reduzindo defeitos provenientes de secagem irregular;
- c) permite a seleção da qualidade das lâminas situadas nas posições de maiores tensões;
- d) permite a construção de peças de eixo curvo, muito convenientes para arcos, tribunas, cascas etc.

A desvantagem mais importante das madeiras laminadas é o seu preço, mais elevado do que o da madeira serrada.

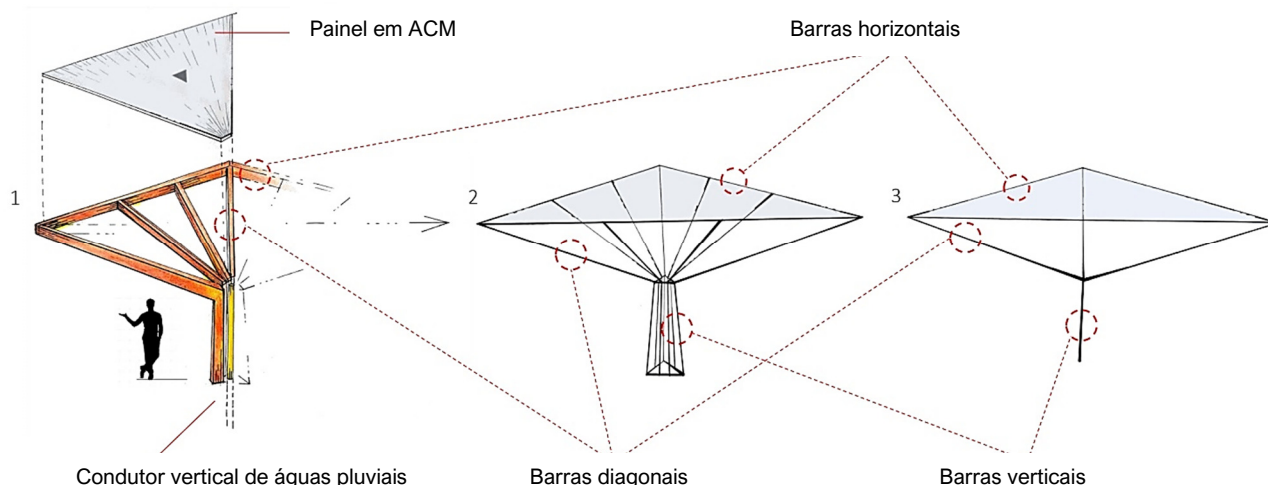
Sobre as características que justificam o elevado preço da MLC, os autores afirmam que os produtos estruturais industrializados de madeira laminada colada são fabricados sob rígidos padrões de controle de qualidade, o que lhes garante resistência e durabilidade (Pfeil, Pfeil, 2003, p. 14). Além da durabilidade e resistência, a MLC oferece outras vantagens, como a possibilidade de confeccionar peças de grandes dimensões e seção variável, com eixo reto ou curvo, o que permite sua adaptação a diversas geometrias.

Já o painel em ACM consiste em um “painel composto, produzido com duas chapas sólidas de alumínio ligadas a um núcleo de material termoplástico extrudado” (Souza, 2008, p.167). Possuem, como características principais, elevada resistência ao dobramento, possibilitando a concepção de formas maleáveis, e padrões de cores diversas. Os painéis em ACM possuem qualidades como vida útil mínima de 40 anos (se respeitadas as condições adequadas de uso e manutenção), possibilidade de reutilização ou reciclagem das placas (se respeitadas as condições adequadas de armazenamento temporário), e elevada resistência mecânica (se corretamente dimensionado) aos esforços de vento, peso próprio e ao dobramento (Souza, 2008). A MLC e os painéis em ACM, em associação, foram escolhidos como materiais dos módulos devido a essas características tecnológicas relacionadas à resistência e à durabilidade, que possibilitam o atendimento do requisito economia de recursos financeiros, sobretudo na manutenção.

O módulo a ser replicado possui um tronco formado por três peças que se ramificam nas três arestas da copa, a qual tem formato de pirâmide invertida com base triangular. Essas arestas definem as diagonais que estruturam a cobertura, onde são fixados os painéis em ACM. A inclinação dos painéis em direção ao centro do módulo permite a drenagem por meio de um condutor vertical, que capta a água da chuva e conduz até reservatórios instalados no solo (Figuras 2 e 3).

A fim de diminuir o custo de processamento computacional, esse módulo foi sucessivamente reduzido às linhas de construção principais antes de iniciar o desenho em *software* de modelagem paramétrica. Por isso, as linhas do tronco que se prologam nas linhas diagonais da copa foram reduzidas a uma linha única do tronco que se ramifica em três linhas diagonais da copa. Apesar disso, as três barras horizontais que formam o triângulo da copa permaneceram. A cobertura inicialmente inclinada e apoiada nas barras diagonais foi reduzida a uma placa única apoiada nas barras horizontais por não interferir na visualização da área efetivamente sombreada durante a simulação solar comentada adiante (Figura 2).

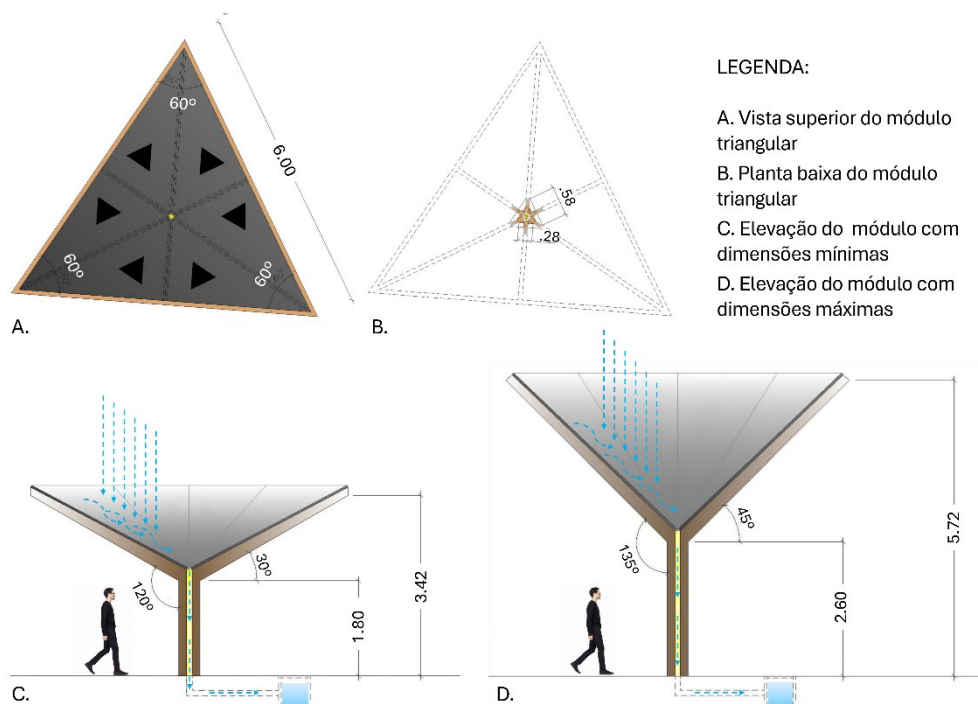
Figura 2: Concepção do módulo pilar-árvore.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Os parâmetros utilizados na modelagem foram: as medidas das barras da base da pirâmide, definidas pelas distâncias mínimas entre os edifícios (4 a 6 metros); a altura das barras verticais do tronco, que estabelecem o plano de teto para circulação livre (1.80 a 2.60 metros); e a altura final da cobertura dos módulos (3.42 a 5.72 metros). A partir da criação de uma geometria associativa, as variações dimensionais do tronco e da copa determinam um domínio de angulação das barras diagonais que varia de 30° a 60°. Por exemplo, quando a altura do tronco é 1,80 m e a da copa é 3,42 m, as diagonais apresentam ângulo de 30°. No entanto, se a altura da copa varia até o limite de 5,72 m, esse ângulo aumenta para 60° (Figura 3).

Figura 3: Módulo de cobertura (*input*).



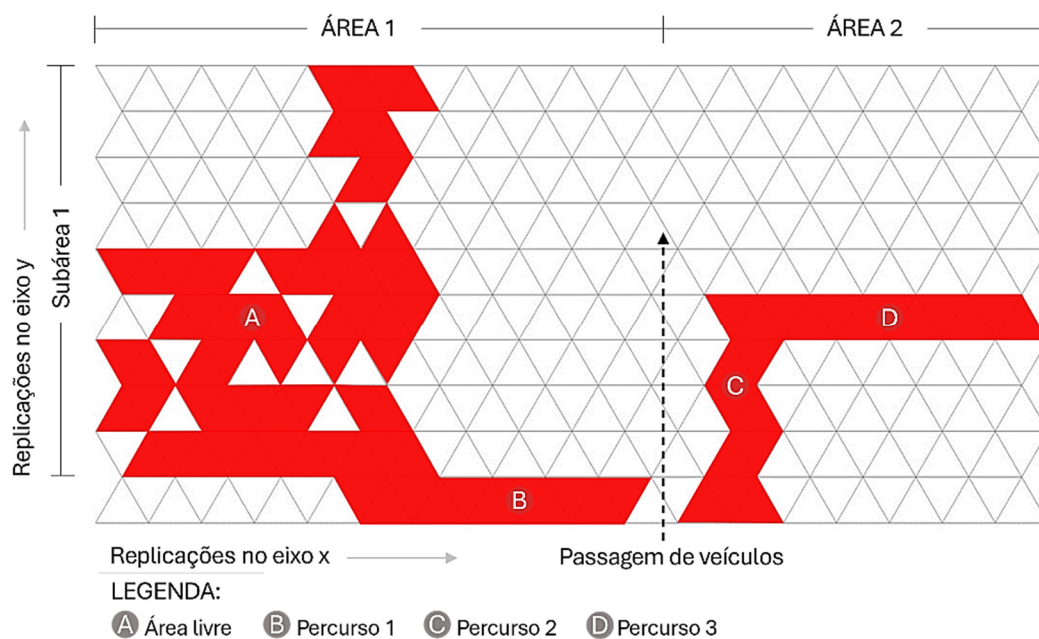
Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Optou-se por utilizar uma malha triangular (*trigrig*) composta de 35 por 10 módulos replicados nos eixos x e y, abrangendo toda a área da intervenção. A escolha da forma triangular pode resultar em geometrias mais econômicas devido à menor quantidade de arestas em comparação com os retângulos, por exemplo. A adequação ao contorno irregular do terreno implicou na definição de duas áreas de intervenção (1 e 2), separadas pela via perimetral onde circulam os veículos de pequeno e médio porte.

Na adaptação ao contorno, utilizaram-se *polylines* associadas ao componente *dispatch*, permitindo a definição de um conjunto de elementos verdadeiros onde os módulos existem e compõem a geometria. Essas operações resultaram em 116 módulos que cobrem o perímetro irregular das áreas 1 e 2. Na modelagem da área 1, novos parâmetros, além dos já mencionados, foram introduzidos durante o processo para reduzir a quantidade excessiva de módulos, atendendo ao critério da economia de recursos e da permeabilidade à luz e ventilação naturais. Assim, definiu-se a subárea 1 aplicando parâmetros de subtração de 1 a 50 módulos, considerando 50 combinações possíveis. Não foram aplicados mecanismos de subtração no percurso 1, da área 1, e nos percursos 2 e 3, da área 2, uma vez que se referem ao acesso principal ao RU e, portanto, devem ser sombreados integralmente (Figuras 4 e 5).

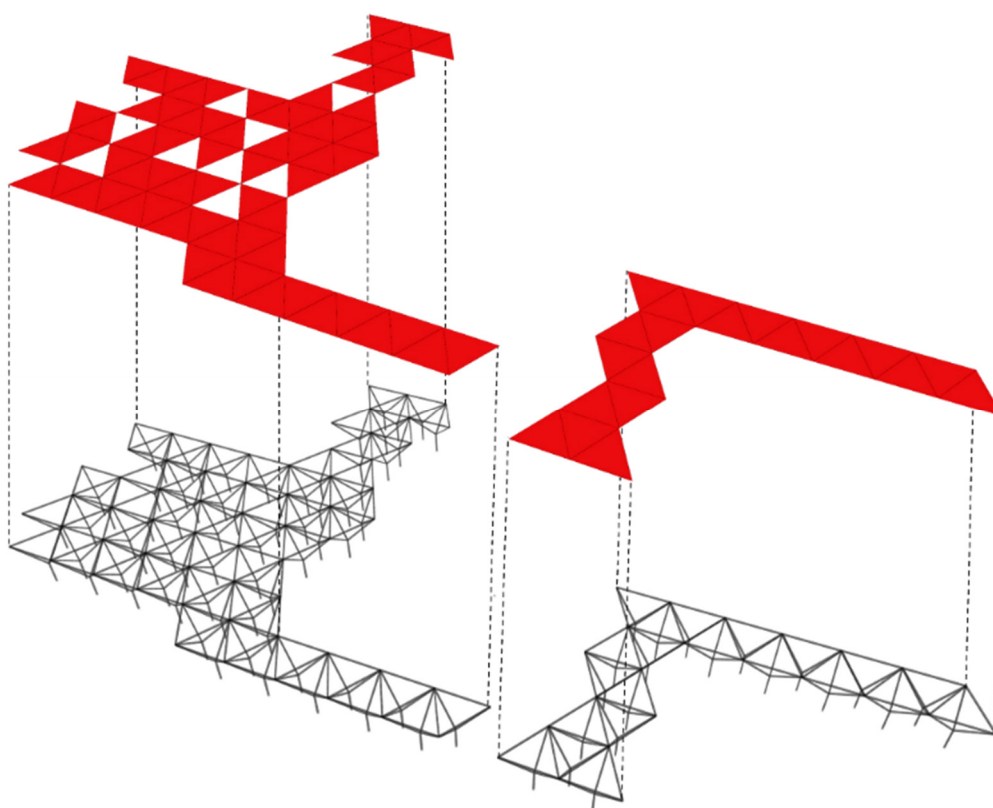
A implementação desses parâmetros e variáveis resultou em um modelo geométrico com estrutura reticulada formada pela associação de barras verticais, diagonais e horizontais e um sistema de coberturas formado por planos triangulares. A geometria associativa definida pela programação algorítmica e pelos parâmetros já indicados definiram várias possibilidades de soluções arquitetônicas que serão avaliadas quanto ao desempenho adequado (Figuras 4 e 5).

Figura 4: Estratégia de modelagem paramétrica – características bidimensionais.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Figura 5: Estratégia de modelagem paramétrica – características tridimensionais.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Esse processo inicial resultou em um sistema modular de coberturas parcialmente vazado, que pode atender à proteção desejada e, ao mesmo tempo, permitir a entrada de iluminação e ventilação natural durante o uso diurno. Os *outputs* gerados antes da etapa de otimização indicam o potencial do artefato de assumir diversas configurações, adaptando-se facilmente às características e limites físicos do contexto. As imagens a seguir mostram duas alternativas de solução (A e B) com distribuição distinta dos módulos, ambas com 44 módulos subtraídos no trecho correspondente à subárea 1. As soluções apresentadas mostram os módulos entremeados por árvores considerando a previsão de arborização intensiva do campus (Figuras 6 e 7).

Figura 6: Implantação do sistema de coberturas – solução A com 44 módulos subtraídos.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

Figura 7: Implantação do sistema de coberturas – solução B com 44 módulos subtraídos.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

As próximas imagens mostram outras configurações assumidas pelo artefato. A solução C tem 42 módulos subtraídos na subárea 1, com uma implantação menos fragmentada do que as alternativas anteriores (Figura 8). Em adição, foram explorados 3 possíveis vetores de ampliação da solução C: duas expansões lineares, em direção às calçadas dos laboratórios e do RU, e uma expansão na superfície do espaço livre em frente ao RU. Embora não tenha sido considerada na etapa de simulação, essa solução ampliada indica o potencial de expansibilidade do sistema proposto para além do perímetro inicial de intervenção (Figura 9).

Figura 8: Implantação do sistema de coberturas – solução C com 42 módulos subtraídos.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

Figura 9: Implantação do sistema de coberturas – solução C com vetores de ampliação.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

As perspectivas a seguir (Figuras 10, 11 e 12) mostram as áreas públicas externas do campus após a requalificação com a implantação do sistema de coberturas. Três possibilidades de uso e apropriação dos espaços, contíguos ao NCEx, são apresentadas para atividades de permanência e deslocamento. A subárea 1, após sombreada, poderia ser utilizada para aulas ao ar livre e atividades como rodas de conversa, comuns em congressos (Figura 10). Além disso, este mesmo espaço poderia ser utilizado como local de descanso nos intervalos das atividades acadêmicas, tanto para estudantes quanto para crianças que acompanham os seus pais e mães (Figura 11). Além disso, os percursos até o RU poderiam continuar a ser utilizados diariamente com mais conforto pelas pessoas que acessam esse serviço cotidianamente (Figura 12).

Figura 10: Perspectiva do sistema de coberturas (Subárea 1) – aula ao ar livre.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

Figura 11: Perspectiva do sistema de coberturas (Subárea 1) – lazer e descanso.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

Figura 12: Perspectiva do sistema de coberturas (Percurso 1) – deslocamentos até o RU.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

Após a visualização das possibilidades de implantação, a próxima etapa de desenvolvimento do projeto consistiu na otimização do artefato a partir de ferramentas de simulação solar, tal como explicado adiante.

Desenvolvimento do projeto – Etapa 2: otimização do modelo paramétrico

O atendimento dos requisitos de projeto exige, segundo Dresch, Lacerda e Júnior (2015, p.126), uma visão sistêmica do problema em investigação e da inter-relação entre os aspectos que possuem maior influência no comportamento do artefato/sistema ao longo do tempo. Os requisitos já mencionados possuem critérios de desempenho conflitantes que devem ser equacionados a fim de se obter uma solução arquitetônica ótima. Em síntese: a. quanto maior a área sombreada, maior a área coberta; b. quanto maior a área coberta, menor a economia de material; c. quanto menor a economia de material, maior o gasto na construção e manutenção; d. quanto maior o gasto na manutenção, maior a possibilidade de deterioração; e. quanto maior a possibilidade de deterioração, menor a chance de apropriação efetiva do espaço. O equacionamento desses requisitos e critérios orientou a etapa de avaliação do modelo por meio do uso combinado de ferramentas computacionais na interface do Rhinoceros/Grasshopper.

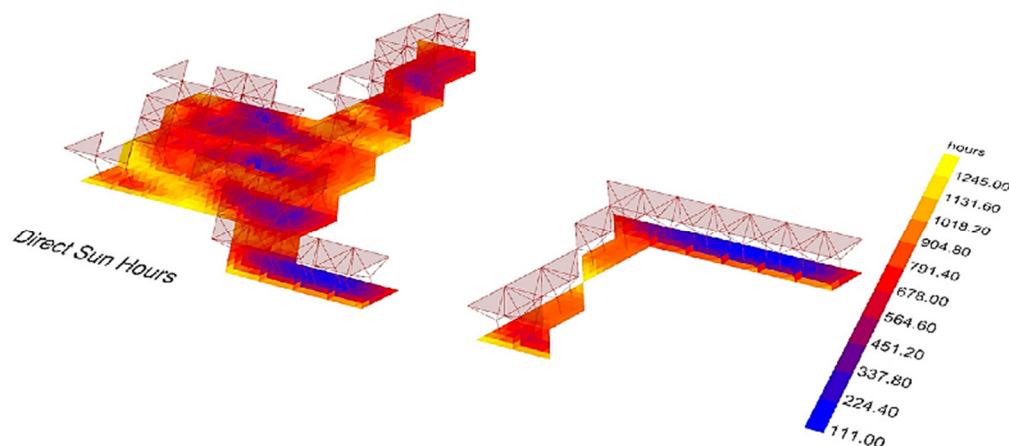
O componente *LB Direct Sun Hours* (Ladybug Tools) foi utilizado para verificar a área sombreada ao longo da estação quente e seca, enquanto o componente *Assemble Model* (Karamba 3D) foi utilizado para montar o modelo estrutural e extrair informações sobre o peso (massa de madeira) associado a dimensões específicas das seções das peças. As informações processadas por esses componentes foram utilizadas como dados de entrada no *Galapagos*, algoritmo genético que possui dois *inputs*: o genoma e a função de avaliação. A simulação de desempenho considerou a estação quente e seca (de outubro a abril), pois corresponde ao período do ano, no contexto analisado, com os maiores valores médios mensais de temperatura do ar. Esse período crítico é caracterizado pelo desconforto térmico e sua maior média, como já dito, corresponde a 27,84 °C, no mês de novembro (Torres, 2017).

Na definição do genoma, considerou-se todos os parâmetros indicados nesta seção do artigo, exceto o número de replicações de módulos nos eixos x e y – valor fixado devido à necessidade de cobrir toda a área de intervenção mesmo com as subtrações pontuais (na subárea 1) efetuadas pelo algoritmo genético. A função de avaliação foi definida pela razão entre o valor mínimo da massa de madeira (aprox. 6.5 t) e o valor máximo da área de piso totalmente sombreada durante o período do ano simulado (1.808 m²). Quanto à área, o *output* considerou a opção em que apenas um módulo de cobertura é subtraído, menor valor do *range* de subtração definido para a subárea 1.

O valor de 6.5 toneladas foi obtido como *output* do modelo estrutural, considerando a quantidade máxima de módulos subtraídos e as seções retangulares comerciais das barras de MLC. Essas seções foram fixadas nas maiores dimensões fornecidas no catálogo de uma construtora especializada (0.18 x 0.18 m), com o objetivo de evitar o subdimensionamento ou definição de peças excessivamente esbeltas, evitando deformações maiores do que a capacidade de carga do material (Ita Engenharia, 2019).

A partir disso, foi definido o valor de limiar de 3,60 (*threshold*) – $(6.5t / 1.808 \text{ m}^2)$ – utilizado pelo algoritmo genético na busca da solução otimizada, considerando os critérios conflitantes já mencionados. Durante a simulação, foram obtidas 10 gerações de indivíduos diversos até a estagnação do processo. Nas gerações 7 e 9, observaram-se os principais pontos de inflexão na forma da geometria, alcançando limiares de 3,63 e 3,60, respectivamente. Até a sexta geração, o algoritmo selecionou formas praticamente idênticas ou com variações pouco expressivas (Figura 13).

Figura 13: Simulação feita pelo algoritmo genético.



Fonte: Imagem extraída do software, 2024.

Para entender a evolução do processo, comparou-se as características dos indivíduos mais aptos dessas gerações com as da solução não otimizada (geração 0), que serviu como ponto de partida para a simulação. A geração 0 apresentava a maior área sombreada, resultado da subtração de apenas 1 dos 84 módulos da subárea 1. No entanto, essa solução seria ineficiente em termos de economia de recursos, devido ao alto consumo de material (8,4 toneladas). Os indivíduos mais aptos das gerações 6, 7 e 9 tiveram 41, 42 e 43 módulos subtraídos, respectivamente, representando uma redução gradual de massa de 20%, 21% e 23%, em relação à geração 0 (Figura 14).

Discussão dos resultados

Entre as soluções otimizadas, a geração 6 apresenta o menor número de subtrações e o segundo maior valor médio de exposição solar (aproximadamente 984 horas), devido à distribuição fragmentada dos módulos. Na geração 9, que possui uma distribuição semelhante a 6, a exposição solar média é a mais alta (993 horas), equivalente ao maior número de subtrações. Já a geração 7, com um valor intermediário de módulos subtraídos, exibe o menor valor médio de exposição solar (954 horas), devido a uma distribuição menos fragmentada dos módulos de cobertura (Figura 14).

Esses resultados indicam que a redução dos módulos teve como consequência o aumento das áreas descobertas. No entanto, os diagramas de falsa cor indicam que os valores médios de exposição solar foram também influenciados pela forma de distribuição dos módulos. Isso sugere que a distribuição fragmentada pode ser uma solução para evitar áreas com sombreamento excessivamente concentrado, ou para aproveitar ao máximo as janelas de sol em regiões de menor insolação.

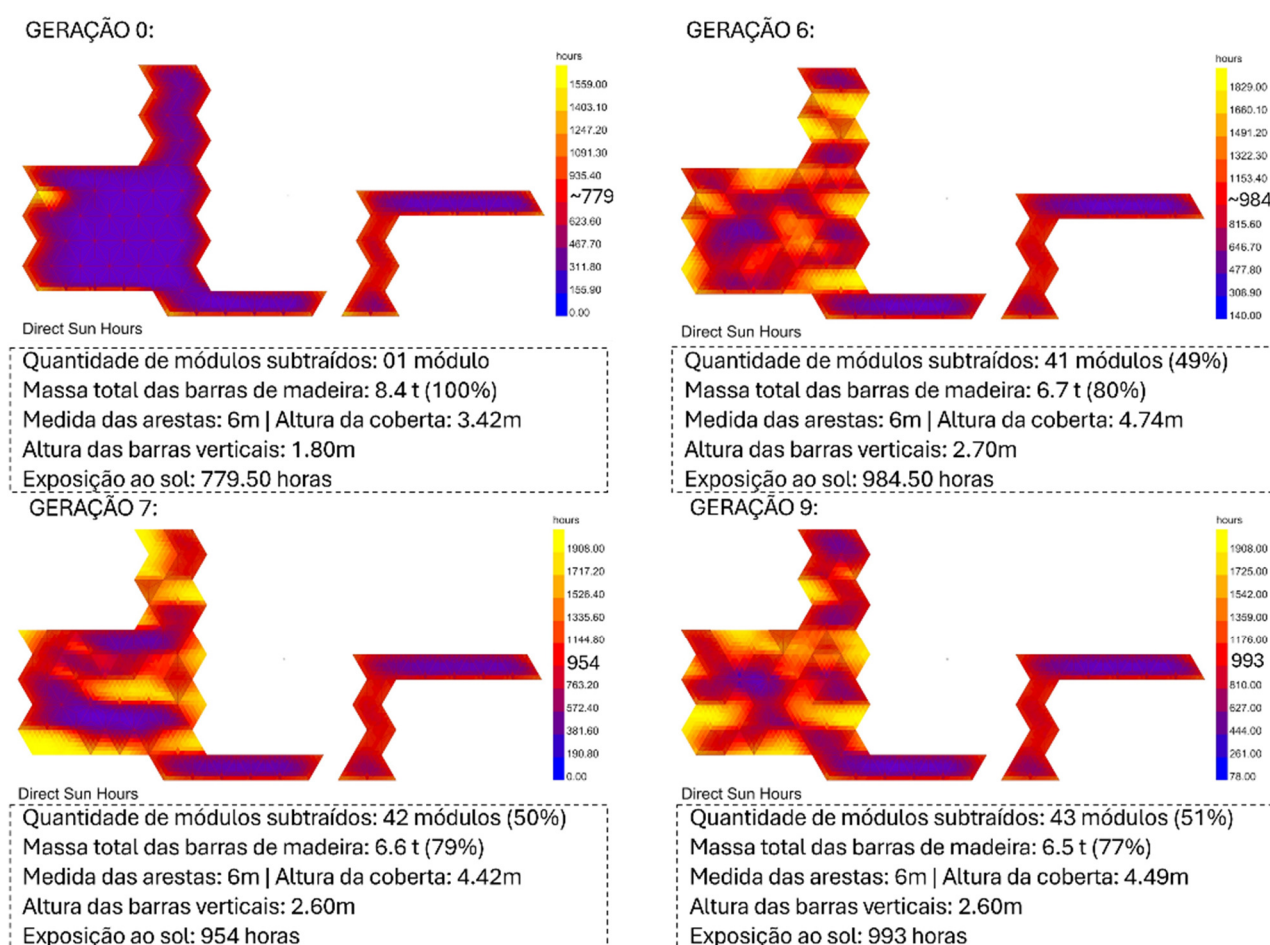
Dessa forma, as gerações que não ocupam áreas ensolaradas de maneira concentrada, como a 6, podem apresentar bom desempenho, com valores médios reduzidos de exposição solar. Nesse sentido, as áreas em tom vermelho (de alta exposição solar), contíguas às áreas sombreadas em tom azulado (de baixa exposição

solar), podem indicar que os módulos, mesmo com a distribuição fragmentada, foram posicionados estrategicamente em locais mais expostos ao sol no perímetro de intervenção.

Quanto às dimensões das barras, observou-se uma variação muito pequena entre as gerações produzidas pela simulação. A altura da cobertura variou de 4,42 a 4,74 metros, enquanto a altura das barras verticais oscilou entre 2,70 e 2,60 metros. Dentro da faixa variável das arestas (4 a 6 metros), as soluções indicadas pelo algoritmo permaneceram com 6 metros. Isso provavelmente ocorreu porque a redução das dimensões dos módulos resultaria em uma porção maior de área descoberta e desprotegida (Figura 14).

As diferenças dos indivíduos mais aptos entre as gerações 6, 7 e 9 são expressivas em relação a geração zero, mas pouco significativas entre si se considerarmos a extensão do projeto. Na prática, as três soluções atenderam objetivamente aos critérios e restrições estabelecidas, porém, as mais adequadas seriam as que possuem distribuição uniforme e alternada (ou fragmentada) de módulos não subtraídos, porque podem garantir o equilíbrio na distribuição entre sol e sombra ao longo do dia (Figura 14). Desse modo, as gerações 6 e 9 seriam mais adequadas à resolução do problema, porque são capazes de sombrear a área livre e aproveitar a luz diurna a um baixo custo de construção (Figura 14).

Figura 14: Resultados da simulação solar (*output*).



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

A partir desses resultados, pode-se afirmar – na perspectiva de Kalay (1999) – que o artefato produzido possui desempenho adequado devido a forma modular e adaptável, que atende a função principal de sombreamento e proteção contra intempéries dentro das limitações financeiras do contexto das universidades. O potencial de expansibilidade e adaptabilidade do sistema modular – associado a não especialização programática – e a capacidade de acomodar usos diversos possibilitam a implementação do artefato em diversos contextos com problemas similares.

A principal limitação identificada pelos resultados do experimento se refere à pouca variação geométrica visualizada durante o processo de busca e seleção das melhores alternativas. A partir dos parâmetros utilizados no *input* do modelo, as únicas variações possíveis seriam nas dimensões e na subtração dos módulos. A não definição de regras matemáticas detalhadas permitiu a aleatoriedade nas operações de subtração, mas os indivíduos gerados possuem certo grau de previsibilidade geométrica.

Esse limite poderia ser superado pela elaboração de encadeamentos topológicos mais sofisticados que pudessem impulsionar a emergência de soluções não antevistas – tal como indicado por Martino (2015) – evitando a estagnação precoce do processo. Uma das possibilidades seria utilizar uma malha triangular ao invés de uma grade triangular, a fim de possibilitar deformações e transformações diversas dentro das novas e diferentes relações topológicas.

4 CONCLUSÃO

Este artigo teve como objetivo sistematizar as etapas do processo de projeto de um artefato a ser implementado no redesenho de ambientes externos de universidades, assim como avaliar o seu desempenho formal, funcional e ambiental. Os resultados alcançados indicam que os requisitos vinculados a esses aspectos (definidos antes do experimento) foram atendidos, atestando o desempenho adequado desse artefato. Porém, há limitações na definição das relações topológicas que precisam ser superadas em novos testes, ampliando o espaço da pesquisa de soluções.

A superação desses limites em novos testes do modelo sinaliza que o problema de projeto não foi inteiramente compreendido no início das atividades. Desse modo, as soluções geradas nessa primeira versão do artefato indicam a necessidade de retorno e refinamento do problema. Isso comprova as hipóteses bem aceitas de que a compreensão do problema (análise) aumenta a cada tentativa de solução (síntese), de modo que análise e síntese se retroalimentam e coevoluem durante o processo de projeto (Cross, 2001; Lawson, 2011). Se o processo tivesse ido adiante, possivelmente teriam sido testadas outras estratégias e recursos de modelagem, que poderiam culminar em soluções mais diversas do que as obtidas no experimento em questão. Esse aspecto representa um possível desdobramento da pesquisa.

Além disso, os resultados permitiram tecer conclusões que ultrapassam o escopo do desempenho do artefato projetado e se referem às escolhas da metodologia de pesquisa e das ferramentas utilizadas no desenvolvimento do projeto. O experimento ratificou a pertinência do uso da metodologia da Design Science Research (DSR) em exercícios projetuais onde se utiliza o design paramétrico, devido a estruturação clara de etapas que orientam o trabalho de pesquisa e possibilitam, ao final, generalizar os resultados para classes de problemas semelhantes.

Em contrapartida, o uso da DSR elucidou a necessidade de valorizar a etapa de formulação do problema de projeto tanto quanto a etapa da busca de soluções. Entender os meandros e nuances do problema, incluindo as demandas sociais e restrições de diversas ordens (técnicas, construtivas, financeiras etc.), é de suma importância em atividades de projeto paramétrico que usualmente enfatizam a construção de formas complexas, exuberantes e não raramente alheias ao contexto de atuação (Arantes, 2012). O atendimento a demandas e restrições de projeto depende de uma visão sistêmica do problema em investigação, incluindo o reconhecimento dos aspectos que possuem maior importância no comportamento do artefato ao longo do tempo (Dresch, Lacerda, Antunes Júnior, 2015).

As ferramentas paramétricas/generativas escolhidas impulsionaram a *performance* do projetista ao possibilitar o equacionamento de condicionantes de difícil resolução nas etapas iniciais de projeto. Sem o uso desses recursos seria difícil e demorado incorporar os condicionantes ambientais e construtivos no projeto. Não obstante, o uso associado de componentes dos *add ons* LadyBug e Karamba 3D, na interface do Rhinoceros/Grasshopper, permitiram a tomada de decisões assertivas a partir de associação complexa de forma, material e função de proteção contra intempéries. O uso do algoritmo genético Galápagos permitiu a automatização e eficiência no processo de busca de soluções ótimas, entretanto, não excluiu a participação do projetista nas tomadas de decisão sobre a solução mais adequada ao contexto de intervenção. Nesse momento, as respostas automatizadas foram filtradas pelo *background* de conhecimentos do projetista sobre a realidade do local escolhido para a experimentação.

Soluções e configurações diferenciadas podem ser obtidas por meio dos mecanismos de geração utilizados, os quais possibilitam a adaptação do sistema de coberturas às características bioclimáticas de outras cidades. Em locais onde o sombreamento permanente de toda a edificação não for recomendado, como na cidade utilizada como local de experimentação, poderiam ser geradas soluções com novas distribuições entre áreas

de luz e sombra, com impacto direto nas horas de exposição solar em trechos específicos ocupados pelo sistema.

Sugere-se, como continuidade desta pesquisa, que a *performance* do artefato seja melhorada, por meio da análise qualitativa e quantitativa do desempenho estrutural e termo energético, permitindo a sua replicação em outras situações/contextos de projeto, onde o problema e as soluções provavelmente assumirão configurações diversas.

AGRADECIMENTOS

O desenvolvimento deste experimento contou com a orientação fundamental do Prof. Dr. Felipe Tavares da Silva, da Universidade Federal da Paraíba (UFPB), a quem agradeço.

REFERÊNCIAS

- ARANTES, P. F. **Arquitetura na era digital-financeira**: desenho, canteiro e renda da forma. São Paulo: Editora 34, 2012.
- BENTLEY, P. J. (Ed.). **Evolutionary Design by Computers**. San Francisco-CA: Morgan Kaufmann Publishers Inc., 1999.
- CELANI, M. G.; VAZ, C.; PUPO, R. Sistemas generativos de projeto: classificação e reflexão sob o ponto de vista da representação e dos meios de produção. **Revista Brasileira de Expressão Gráfica**, v. 1, n. 1, p. 22-39, 2013. Disponível em: <https://rbeg.net/new/index.php/rbeg/article/view/3>. Acesso em: 5 fev. 2025.
- CHU, K. S. A metafísica da arquitetura genética e da computação. In: SYKES, K. A. (org.). **O campo ampliado da arquitetura**: antologia teórica (1993-2009). Tradução: Denise Bottman; Roberto Grey; Ana Luiza Nobre. São Paulo: CosacNaify, 2013. p. 321-329.
- CROSS, N.; DORST, K. Creativity in the design process: co-evolution of problem-solution. **Design Studies**, v. 22, n. 5, p.425-437, 2001. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0142-694X\(01\)00009-6](https://doi.org/10.1016/S0142-694X(01)00009-6)
- DRESCH, A.; LACERDA, D. P.; ANTUNES JÚNIOR, J. A. V. **Design science research**: método de pesquisa para avanço da ciência e tecnologia. Porto Alegre: Bookman, 2015.
- FLORIO, W. Modelagem paramétrica. In: BRAIDA, F.; LIMA, F.; FONSECA, J.; MORAIS, V. (org.). **101 conceitos de Arquitetura e Urbanismo na Era Digital**. São Paulo: ProBooks, 2016. p. 139-140.
- ITA ENGENHARIA. **Madeira Laminada Colada (MLC) de Eucalipto [Caderno de detalhes construtivos]**. São Paulo, 2019. Disponível em: <https://www.itaengenharia.com/tecnologia/>. Acesso em: 05 fev. 2025.
- JABI, W. **Parametric Design for Architecture**. China: Laurence King Publishing, 2013.
- KALAY, Y. E. Performance-based design. **Automation in Construction**, v. 8, n. 4, p. 395-409, 1999. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0926-5805\(98\)00086-7](https://doi.org/10.1016/S0926-5805(98)00086-7).
- LAWSON, B. **Como arquitetos e designers pensam**. Tradução: Maria Beatriz Medina. São Paulo: Oficina de textos. 2011.
- LEMONGE, A. C. C. Algoritmo genético. In: BRAIDA, F.; LIMA, F.; FONSECA, J.; MORAIS, V. (org.). **101 conceitos de arquitetura e urbanismo na era digital**. São Paulo: ProBooks, 2016. p. 24-25.
- MARTINO, J. A. De. **Algoritmos evolutivos como método para desenvolvimento de projetos de arquitetura**. 2015. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Unicamp, Campinas-SP, 2015. Disponível em: <https://repositorio.unicamp.br/acervo/detalhe/946623>. Acesso em: 05 fev. 2025.
- OXMAN, R. Theory and design in the first digital age. **Design Studies**, v.27, n.3, p.229-265, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.destud.2005.11.002>.
- _____. A performance-based model in digital design: PER-FORMATIVE – Design beyond aesthetic. **Architectural Engineering and Design Management**, v. 3, n. 3, p. 169-180, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1080/17452007.2007.9684640>.
- _____. Performance-Based Design: Current Practices and Research Issues. **International Journal of Architectural Computing**, v. 6, n. 1, p. 1-17, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1260/147807708784640090>.
- _____. Performative design: a performance-based model of digital architectural design. **Environment and Planning B: Planning and Design**, v. 36, n. 6, p. 1026-1037, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1068/b34149>
- PFEIL, W.; PFEIL, M. **Estruturas de Madeira**. 6. ed. Rio de Janeiro: Editora LTC: 2003.
- RUTTEN, D. **Evolutionary Principles applied to problem solving**. 2010. Disponível em: <http://www.Grasshopper3d.com/profiles/blogs/evolutionary-principles>. Acesso em: 5 fev. 2025.

SILVA, M. F. da. **Estratégias bioclimáticas para seis cidades alagoanas**: contribuições para a adequação da arquitetura ao clima local. 2019. 187 f. Dissertação (Mestrado). PPG em Arquitetura e Urbanismo. Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Alagoas. Maceió, 2019. Disponível em: <https://www.repositorio.ufal.br/handle/riufal/5791>. Acesso em: 28 jul. 2025.

SOUZA, J. et al (Orgs.). **Alternativas tecnológicas para edificações**. São Paulo: Editora PINI, 2008.

SPERLING, D. Topologia. In: BRAIDA, F.; LIMA, F.; FONSECA, J.; MORAIS, V. (Orgs.). **101 conceitos de arquitetura e urbanismo na era digital**. São Paulo: ProBooks, 2016. p. 205-206.

TORRES, S. C. **Forma e conforto: estratégias para (re)pensar o adensamento construtivo urbano a partir dos parâmetros urbanísticos integrados à abordagem bioclimática**. 2017. 397f. Tese (Doutorado). PPG em Arquitetura e Urbanismo. Universidade Federal de Pernambuco, Recife-PE, 2017. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/22459>. Acesso em: 5 fev. 2025.

VARELA, P. A. Genetic algorithms in architecture: history and relevance. **Education and research in Computer Aided Architectural Design in Europe (eCAADe)**, 1., Regional International Workshop – Future traditions, 2013, p. 133-142. Disponível em: <https://pedroazambujavarela.net/future-traditions-1st-ecaade-regional-international-workshop/>. Acesso em: 5 fev. 2025.

UFAL. **Plano Diretor UFAL Campus Arapiraca**: Sede e Unidades. Produto III. Diretrizes estruturantes e setoriais: proposta para discussão junto à comunidade acadêmica. Arapiraca-AL: Universidade Federal de Alagoas (UFAL), 2012. Disponível em: https://arapiraca.ufal.br/institucional/plano-diretor-campus-arapiraca/arquivos/3-1-diretrizes-propostas_sede-arapiraca/view. Acesso em: 18 ago. 2025.

NOTAS

¹ Tradução livre do texto original em inglês: “*Performance-based design recognizes that different forms can successfully achieve similar functions, and that different functions can often be afforded by similar forms. In addition, it accounts for performance variances of the same form/function combinations within different contexts*” (Kalay, 1999, p. 396).

² Tradução livre do texto original em inglês: “*it is the human designer who adapts the geometric design model in order to accommodate optimized and evaluative findings*” (Oxman, 2008, p.5).

³ Tradução livre do texto original em inglês: “*Performance-based design is redefined as the ability to directly manipulate the geometric properties of a digital model on the basis of performative analyses in order to optimize performance. Instead of analyzing the performance of a design, and modifying it accordingly, ultimately it may be possible to directly inform, generate and modify the design model using performance-based simulations*” (Oxman, 2006, p.5).

⁴ A tese de doutorado de Torres (2017) apresenta um perfil climático detalhado da cidade em questão. Esse perfil foi elaborado a partir da tabulação dos dados emitidos pela estação meteorológica automática do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), implantada em maio de 2008, e se refere às variáveis de temperatura do ar, umidade do ar e precipitação.

⁵ A Madeira Laminada Colada (MLC) foi criada na Alemanha, teve grande aceitação na Europa e se popularizou no Estados Unidos (Pfeil, Pfeil, 2003). No Brasil, a utilização desse material está sendo difundida por meio de projetos arquitetônicos divulgados na mídia especializada e premiados internacionalmente, tais como as Moradias Infantis Canuanã – Fundação Bradesco, projetadas por Marcelo Rosenbaum e Aleph Zero, e executadas pela ITA Construtora. Mais informações estão disponíveis em: <https://www.itaengenharia.com/projetos-de-construcao-com-estrutura-em-madeira/moradias-infantis/>. Acesso em: 05 fev. 2025.

NOTA DO EDITOR (*): O conteúdo do artigo e as imagens nele publicadas são de responsabilidade do autor.