REVISTA DESIGN & TECNOLOGIA
ISSN: 2178-1974
2023, Vol. 13, No. 26
DOI 10.23972/det2023iss26pp103-118

PGDESIGN
www.pgdesign.ufrgs.br

Geração automatizada multicritério: estudo de caso em casas unifamiliares de interesse social

Pedro O. P. Mariano[1]; Carlos E. V. Vaz[2]

1 *Departamento de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo - PósArq. Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, Florianópolis, Brasil*

2 *Departamento de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo - PósArq. Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, Florianópolis, Brasil*

RESUMO

A pesquisa visa desenvolver e aplicar um processo de projeto automatizado multicritério na formação de casas de interesse social no Brasil. A criação do algoritmo foi executada em um software de modelagem e programação, utilizando como estratégia processos de programação visual e de *script*. Para tanto, o algoritmo foi estruturado em quatro etapas: inicialmente, são construídas as dimensões do terreno; na sequência, é organizada uma composição a partir de regras; após, são adicionadas características arquitetônicas (janelas, portas); e por fim, a composição passa por um conjunto de simulações, visualizações e coleta de dados sensíveis, a saber: orçamento — por meio do CUB e CUG — e distribuição da luz do dia e radiação incidente nas fachadas. Ao final, o processo torna-se possível criar de forma autônoma um anteprojeto diferente para cada momento em que a programação é acionada. As características e dados quantitativos do partido são salvos, permitindo assim, a comparação entre os diferentes resultados. Para validar a programação, buscou-se utilizá-la na construção de uma casa de interesse social para um concurso de arquitetura no Brasil. Além da experiência de solucionar um problema real de arquitetura com a programação, foi possível abordar como o uso de tecnologias e sistemas automatizados podem ser aplicados nas práticas contemporâneas do projeto. Demonstra-se assim, como a utilização da programação possibilita não só expandir a imaginação por meio da visualização de composições não planejadas, mas também permite a tomada de decisões de modo mais assertivo. Considerando também as avaliações do concurso pode-se trazer a discussão sob a ótica de quais aspectos e critérios relevantes uma arquitetura pode ser julgada, considerando as ponderações da banca de arquitetos avaliadores do concurso.

PALAVRAS-CHAVE
Geração automatizada de leiautes;
processo paramétrico;
interesse social;
orçamento;
comportamento lumínico.

Automated Multi-Criteria Generation: Case Study in Single-Family Homes of Social Interest

ABSTRACT

The research aims to develop and apply an automated multi-criteria design process in the formation of houses of social interest in Brazil. The creation of the algorithm was performed in modeling and programming software, using visual and script programming processes as a strategy. Therefore, the algorithm was structured in four steps: initially, the dimensions of the terrain are constructed; next, a composition based on rules is organized; then architectural features (windows, doors) are added; and finally, the composition goes through a set of simulations, visualizations, and sensitive data collection, namely: budget — through CUB and CUG — and distribution of daylight and radiation incident on the facades. In the end, the process becomes possible to autonomously create a different preliminary project for each moment in which the programming is activated. The characteristics and quantitative data of the party are saved, thus allowing the comparison between the different results. To validate the program, we tried to use it in the construction of a house of social interest for an architecture competition in Brazil. In addition to the experience of solving a real architectural problem with programming, it was possible to address how the use of technologies and automated systems can be applied in contemporary design practices. It is thus demonstrated how the use of programming makes it possible not only to expand the imagination through the visualization of unplanned compositions but also allows for more assertive decision-making. Also considering the evaluations of the competition, the discussion can be brought from the perspective of which aspects and relevant criteria an architecture can be judged, considering the considerations of the panel of architects evaluating the competition.

KEYWORDS
Automated layout generation;
parametric process;
social interest;
budget;
luminous behavior.

CONTATO: Pedro O. P. Mariano – *pedro.pm@hotmail.com*

© 2023 – Revista Design & Tecnologia

1. INTRODUÇÃO

O processo de elaboração de um projeto, do ponto de vista da criação humana, pode ser considerado uma atividade de alto nível intelectual, exigindo funções e pensamentos propriamente humanos para ser concebido como: intuição, escolha e interpretação. No entanto, a prática profissional atual está globalmente transformada por procedimentos orientados por ferramentas digitais, mas que ainda não estão potencializados. Neste sentido, a resistência em não expandir o uso da computação na formulação do projeto pode ser, em parte, caracterizada pela falta da aplicação computacional na formação de arquitetos e pela pouca visibilidade do uso efetivo, ou do resultado, da sua utilização. Além disso, o pouco uso da lógica algorítmica na formulação dos projetos também é refém da falta de interpretação entre a relação de conceitos matemáticos determinísticos com o processo do design do projeto (TERZIDIS, 2006).

O vasto e o alto nível de conteúdo produzido a respeito do design digital, a partir da década de 1990, fez com que diferentes distinções metodológicas fossem desenvolvidas com relação ao tema. Oxman (2006) estrutura e organiza essas metodologias para se explicar e definir os paradigmas do design digital, de modo a identificar e discutir os modelos de praxe. A autora traz cinco classes principais para processos de projetos que utilizam de ferramentas computacionais, sendo: Modelos CAD (*CAD models)*; Modelos de formação (*Formation models*); Modelos generativos (*Generative models*); Modelos de desempenho (*Performance models*); e Modelos compostos integrados (*Integrated compound models*). E segundo Oxman (2006), podem ser exemplificados como:

I. Os Modelos CAD foram o principal artifício da mudança de paradigma entre os processos feitos em papel e o seu afastamento para as mídias digitais, transformando decisões que antes eram implícitas (analógicas), agora em ações explícitas passíveis de serem observadas (por ferramentas computacionais);

II. O modelo Formação traz resultados que se afastam das abstrações estáticas de modelos de conceitos formais, para trazer concepções dinâmicas, como a libertação lógica da representação convencional e a transformação da ideia de forma para a de formação. A utilização desse modelo faz com que haja uma alta interação da geometria com o projetista, que necessita de uma maior habilidade digital, mas permite um refinamento da qualidade formal nos projetos;

III. Os modelos generativos não tratam diretamente da estrutura de modelagem do objeto, mas sim, da utilização de mecanismos computacionais que processam a geração da forma, tais como: o uso de gramática da forma; e modelos evolutivos.

IV. Os Modelos de desempenho são designs gerados e conduzidos a partir de um determinado desempenho almejado e não somente um modelo de avaliação. Nesse caso, a definição de desempenho vem como uma técnica que permite a variação de parâmetros de modo a interpretar e resolver um problema;

V. Os Modelos compostos (*Integrated compound models*) são uma visualização futura de como o processo poderia se desenvolver com a integração maior das mídias digitais. Neles podem ser integrados os diferentes componentes que formam as estruturas das classes: formação, geração, avaliação e desempenho.

Contudo, a utilização de estratégias computacionais aplicadas em problemas específicos de projeto como a resolução de plantas baixas ou geração de estruturas otimizadas já é possível e pode ser visualizada em trabalhos como: Rodrigues, Gaspar e Gomes (2013) que desenvolvem um algoritmo evolutivo híbrido capaz de resolver projetos com diferentes andares; Thakur e Kumari (2010) que criam leiautes através de algoritmos generativos; Coorey e Jupp (2014) que geram avaliações de organizações espaciais para plantas baixas –*Space Planning*-, utilizando como base o processo GMPDS — *Generative multiperformance design system*; entre outros.

Ainda assim, muitas vezes estes processos tendem a se concentrar em resolver problemas com variáveis específicas e não de parâmetros pertencentes a diferentes especialidades da área da arquitetura e construção. Esta situação ocorre, pois, um problema de projeto arquitetônico pode ser considerado multicritério se a sua resolução depende de estratégias baseadas na combinação de um pensamento lógico e heurístico. Além disso, trata-se de um processo não linear e que profissionais constroem métodos de resolução segundo diferentes estratégias de pensamento. Deste modo, para ultrapassar esse entrave, são necessárias soluções heurísticas e adaptativas com problemas que são pouco lineares para um algoritmo resolver. Assim como os obstáculos para a resolução de projetos arquitetônicos que possuem uma complexidade maior em relação aos outros processos de design por apresentarem uma série de decisões pessoais e fatores difíceis de serem codificados (TERZIDIS, 2006).

Atualmente, com o desenvolvimento de aplicativos específicos ao campo da arquitetura e engenharia, os problemas de projeto podem ser solucionados de modo mais rápido e preciso (KOTNIK, 2010). Isto significa que com a união de diferentes e novas disciplinas, os sistemas computacionais têm se adaptado para a solucionar problemas de maneira coletiva, atendendo objetivos distintos e também pontuais. Portanto, com a inserção gradativa de novas disciplinas e a necessidade de desempenho crescente nas construções, o aumento da demanda de resoluções de multicritério só tende a crescer (ALFARIS e MERELLO, 2008; CALIXTO, 2016).

Como resultado, esta pesquisa visa integrar diferentes estratégias e ferramentas computacionais com a intenção de gerar, simular e comunicar uma solução de projeto a partir da estruturação de um processo performativo multicritério (OXMAN, 2006). Como estudo de caso, a investigação se concentrou em criar um método aplicado ao projeto de residências unifamiliares de interesse social. Durante o processo de pesquisa foi implementado um sistema generativo para gerar plantas baixas e avaliar, por meio, de um processo desempenho multicritério, aspectos relacionados ao custo, a qualidade lumínica da luz do dia, radiação incidente e composição. A utilização da programação no processo visa demonstrar ser possível expandir as opções formais de composição, podendo criar padrões que não estão no repertório do projetista ou ainda não foram testados. Desse modo, é possível vislumbrar soluções de problemas de design a partir de um conjunto de critérios, de diferentes disciplinas e de resoluções formais. Além de avaliar o orçamento (custo de construção) por meio do CUG — Custo Unitário Geométrico — e CUB — Custo Unitário Básico, assim como a distribuição interna da luz do dia —*Daylight Autonomy*—, radiação incidente nas fachadas e aspectos formais que condizem com as características das habitações de interesse social.

Com o resultado é possível desenvolver variadas composições como partidos arquitetônicos em um espaço abstrato — que representa um terreno —delimitado por recuos parametricamente ajustáveis. A quantidade de cômodos, dimensões e organização do espaço são coordenados por regras descritas na programação que proporcionam uma série de composições aleatórias, mas que

seguem um determinado padrão. A programação também divide a composição em quantitativos de divisórias, áreas e ambientes, possibilitando a validação por simulações, visualizações e fórmulas matemáticas.

Para ampliar a discussão e compreender o impacto dos resultados obtidos, foi realizada a inscrição e participação em um concurso de arquitetura cujo objetivo era selecionar a melhor solução de projeto para habitação de interesse social em Santa Catarina. A participação neste processo de seleção permitiu compreender diversas questões sobre a utilização e limitação de sistemas automatizados e do processo de desempenho multicritério no campo da arquitetura e urbanismo.trico —

2. PROCESSO COMPUTACIONAL NO PROJETO DE HABITAÇÃO SOCIAIS

Como salienta Constantino e Machado (2019) o crescimento desorganizado gera uma sobrecarga na infraestrutura urbana, afetando a qualidade de vida dos cidadãos e as condições de moradia, principalmente da população de baixa renda. Como resultado, segundo Rubin e Bolfe (2014), estratégias de produção habitacional estão muitas vezes atreladas à dependência de políticas públicas para viabilização de projetos, seja em relação a aspectos sociais ou econômicos.

Constantino e Machado (2019) também explicam haver uma série de questões que envolvem a produção de moradias sociais no Brasil, e parte delas está atrelada a contextos históricos como a formulação de estatutos e leis. O desenvolvimento dessa tipologia que passou a ter sua implantação massificada, acabou por não se adequar às diversidades familiares e regionais. Nessa perspectiva, deve considerar contextos que abrangem definições de políticas públicas, segregação socioespacial urbana, valor do solo, equidade social, eficiência e sustentabilidade urbana e ambiental.

Rubin e Bolfe (2014) afirmam que mesmo com o Estatuto da Cidade apresentando normas a respeito do cumprimento das carências habitacionais, na prática, não se contempla as necessidades mínimas da moradia que incluem: saneamento básico, acessibilidade, adaptabilidade sociocultural e ambiental. Com esta orientação, seria necessário considerar no processo de projeto aspectos relacionados às configurações espaciais de diferentes tipologias, articulações e flexibilização das células habitacionais, bem como, relações do objeto com os lotes vizinhos e o espaço público, inserção do conjunto e contexto urbano mais próximo e aspectos de desempenho da edificação. Contudo, considerar tantos parâmetros conjuntamente no processo torna a atividade complexa e custosa não apenas financeiramente, mas cognitivamente. Isto ocorre, pois, é necessário que uma equipe formada por profissionais de diferentes áreas coordene a atividade de projeto.

Neste contexto, diferentes estratégias computacionais podem ser utilizadas de modo que haja uma adequada coordenação no processo de investigação de uma solução de projeto. Assim, a utilização de processos digitais além de dinamizar o desenvolvimento de projetos de interesse social ainda pode possibilitar a escolha de soluções que apresentem o desempenho almejado para diferentes critérios, a saber: custo, temperatura, luz, etc.

A aplicação de novos conhecimentos, ferramentas e métodos para a produção e avaliação de projetos é um processo que pode se tornar mais complexo à medida que sua capacitação demanda tempo, recursos humanos, hardwares e softwares adequados, instituições de ensino e órgãos avaliadores. Entretanto, o avanço das pesquisas científicas voltadas para a utilização de ferramentas computacionais vinculadas aos processos de projeto pode auxiliar a criar soluções mais eficientes, comprovando e elucidando processos não lineares, demonstrando que a contínua retroalimentação e simulação podem apresentar informações importantes para definições de projeto. Essas comprovações e métodos também devem ser utilizados por avaliadores e instituições, de modo a não limitar as verificações em desenhos e critérios quantitativos, mas sim para utilizá-los como informações que efetivamente comprovem o controle das variáveis físicas do projeto. O uso do computador por profissionais arquitetos permite que as avaliações sejam integradas aos processos, possibilitando que os projetistas consigam ter uma maior consciência do papel cultural, social e econômico desempenhado pelo projeto de obras arquitetônicas (FATTINNANZI e MICELLI, 2019).

Diferentes trabalhos utilizaram processos performáticos ou generativos para melhorar ou descobrir composições formais relacionados ao desenvolvimento de projetos de interesse social, tais como: Leitzke *et al.* (2021); Berzele, Brasileiro e Silvoso (2021); e Xavier e Lukiantchuki (2021).

No trabalho de Leitzke *et al.* (2021) são apresentados dois algoritmos evolutivos multiobjetivos que alteram os valores da transmitância térmica de paredes, piso e da cobertura, orientação solar e absortância solar externa, com valores pré-estabelecidos. Já no artigo de Berzele, Brasileiro e Silvoso (2021) um método paramétrico de otimização multiobjetivo modifica parâmetros relativos à geometria de habitações sociais em Chapecó/SC tendo como objetivo melhorar as condicionantes térmicas da edificação referentes aos graus-hora de resfriamento e aquecimento. Na pesquisa de Xavier e Lukiantchuki (2021) uma análise com simulação paramétrica é realizada para se verificar a interferência dos muros na qualidade do vento de habitações de interesse social.

No entanto, mesmo os trabalhos que utilizaram multiobjetivos em seu desenvolvimento, estes focam em somente uma disciplina, sem que os parâmetros ou critérios entrem em conflito. Os trabalhos também relacionam características da construção — como a morfologia de janelas e materiais — aos parâmetros das simulações, mas não estão direcionando a formação do leiaute ao desempenho simulado.

Buscando otimizar diferentes critérios para alcançar um exemplo de habitação social que atenda um padrão satisfatório em aspectos espaciais e quantitativos, como radiação, luz do dia, vizinhança, etc. O processo computacional multicritério desenvolvido se estruturou em uma série de especialidades e tecnologias, que aplicadas possibilitaram a criação de diferentes composições como anteprojetos em um espaço abstrato. Dessa forma permite-se que essas composições sejam avaliadas conforme critérios estabelecidos por normas e editais.

3. CORPO TEÓRICO E FERRAMENTAL PARA A ESTRUTURAÇÃO DE UMA AVALIAÇÃO PERFORMATIVA MULTICRITÉRIO

Considerando o avanço das ferramentas computacionais desenvolvidas para o campo da arquitetura e engenharia, a resolução e combinação dos espaços de uma planta podem ser solucionados de modo mais rápido e preciso. Contudo, a presença de novas métricas, relacionadas a outras especialidades, propicia a formação de subproblemas que devem ser tratados durante a composição dos espaços. Como resultado, estes sistemas computacionais devem se adaptar a problemas de maneira coletiva, solucionando objetivos distintos e pontuais (LOUKISSAS, 2012).

Ainda assim, um problema de projeto — também definido como *ill structured problem* — em diversas situações pode não ter sua resolução alcançada por uma estratégia linear ou

também pode não gerar apenas uma resposta possível. Nestes casos, diferentes soluções podem ser verificadas para chegar na mais adequada para um problema de design (LOUKISSAS, 2012). Como resultado, as estratégias para a resolução de um problema variam muito. Além disso, há uma grande dificuldade para que um grupo pequeno de profissionais consiga realizar uma avaliação considerando os mais variados aspectos de desempenho.

Os Modelos de Desempenho (performance models) são soluções de projeto geradas a partir de um determinado desempenho e não de apenas um modelo de avaliação. O processo ocorre pela variação de um conjunto de parâmetros para resolver um problema de desempenho. A partir da modificação de variáveis pertencentes a uma métrica, são realizadas simulações repetidas vezes, e com o conjunto dos dados levantados, é gerada a solução de projeto (OXMAN, 2006).

No entanto, muitos problemas de projeto demandam a avaliação de diferentes métricas, que podem apresentar conflito entre si. Assim, é necessário desenvolver um Modelo de Desempenho Multicritério para considerar múltiplos aspectos quantitativos referentes a um conjunto de análises. A utilização desse modelo possibilita ao projetista não apenas equilibrar suas decisões segundo aspectos normativos, mas também identificar a interferência que essas decisões geram em outros critérios avaliativos (GABRIELLI, RUGGERI E SCARPA, 2019).

Para simular a geração de solução por uma avaliação performativa multicritério, é necessário definir uma série de conceitos e ferramentas que irão colaborar com o processo de implementação do sistema. Nesta seção, serão apresentados os principais elementos que orientaram a implementação do processo performativo multicritério, a saber: as ferramentas computacionais; os métodos que auxiliam na formação das composições — a gramática da forma e a busca estocástica; os dois métodos quantitativos utilizados para calcular o custo das composições desenvolvidas — CUB e CUG; e o índice lumínico utilizado. A Figura 1 apresenta a estrutura dos conceitos utilizados em suas respectivas etapas da pesquisa.

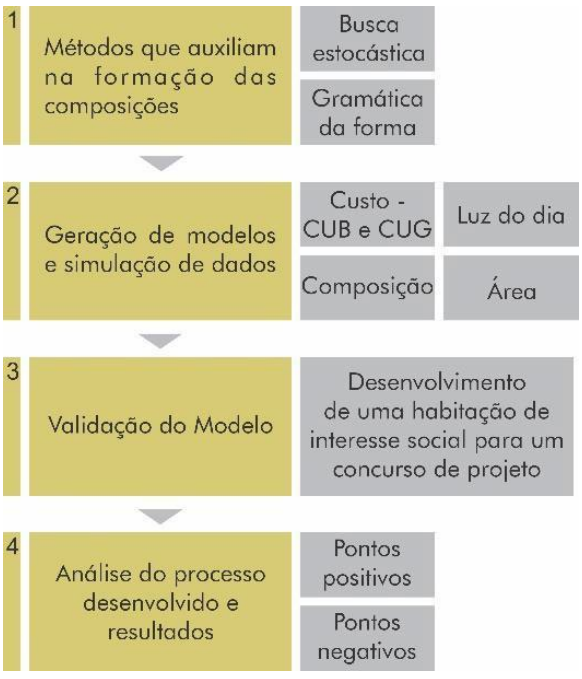


Figura 1 Esquema gráfico com a estrutura dos conceitos utilizados em suas respectivas etapas da pesquisa (Fonte: Elaborado pelos autores)

3.1 Ferramentas Computacionais

Para a implementação do processo performativo multicritério, foi estabelecida como plataforma principal o software de modelagem tridimensional Rhinoceros 3D (MCNEE, 2014) e seu componente Grasshopper (RUTTEN E MCNEEL, 2004). Além disso, vários outros módulos de extensão foram incorporados, tais como os plugins Wasp (ROSSI, 2017), ClimateStudio (SOLEMMA, 2021), Ladybug (SADEGHIPOUR e SUBRAMANIAM, 2016) e Colibri da ferramenta TT toolbox (TOMASETTI, 2017).

A ferramenta de modelagem computacional foi utilizada para visualizar os resultados da programação, além de ser o software base para a ferramenta de programação visual. A versão empregada na pesquisa foi o Rhinoceros 7, com a sua versão de licença educacional, este modelador tridimensional pode criar, editar, analisar, documentar, renderizar, transformar curvas, superfícies e sólidos baseados em coordenadas NURBS (MACNEE, 2014). O Grasshopper, editor de algoritmo gráfico integrado com as ferramentas de modelagem 3D do Rhinoceros, foi utilizado tanto para o desenvolvimento da programação visual quanto para a escrita. Este editor permite a criação de formas, dados e formulários, visualizados em sua interface e na do Rhinoceros (RUTTEN E MCNEEL, 2004). Cada um dos quatro plugins utilizados pretendem:

I. O Wasp é um aplicativo que possibilita o uso da busca estocástica e da gramática da forma por ferramentas combinatórias para projetar elementos a partir de um grafo topológico. Tal plugin oferece uma série de procedimentos de agregação, permitindo a geração, visualização e processamento de estruturas orientadas por geometria e dados (ROSSI, 2017).

II. O ClimateStudio é um programa que visa realizar a análise de iluminação natural, artificial elétrica e análise térmica conceitual. Seus fluxos de trabalho de simulação ajudam a otimizar edifícios para eficiência energética, acesso à luz do dia, conforto visual, térmico e outras medidas para melhorar a saúde dos ocupantes (SOLEMMA, 2021).

III. Os componentes do Ladybug podem ser usados para a verificação da radiação incidente nas fachadas. Este plugin é uma coleção de aplicativos gratuitos que oferecem suporte na visualização de análises ambientais — térmicas, iluminação natural, etc. O Ladybug Tools utiliza motores de simulação como o: Radiance, EnergyPlus, OpenStudio, Therm e OpenFoam (SADEGHIPOUR e SUBRAMANIAM, 2016).

IV. O Colibri do plugin TT tool box é utilizado para coletar os dados quantitativos de saída, direcionando os resultados para tabelas no Excel. O colibri permite que os resultados do Grasshopper se tornem compatíveis com os outros programas computacionais. Além de permitir trabalhar em dois estágios: interação e agregação (TOMASETTI, 2017).

3.2 Gramática da Forma e Busca Estocástica - o processo de geração

Com base em métodos da área da computação e otimização, foram combinados processos como a gramática da forma e a busca estocástica. A gramática da forma é um sistema moldado a partir de regras que direcionam a categoria de geometria que será gerada, respeitando uma lógica pré-estabelecida e as diferentes possibilidades de combinações (CELANI *et al*. 2006).

A gramática da forma *shape grammar* tem suas origens em sistemas matemáticos e em gramáticas generativas, e seu desenvolvimento iniciou na década de 1970 com George Stiny e James Gips. Uma das finalidades da utilização desse sistema é utilizá-lo como um processo de geração de forma que ao invés

de projetar diretamente a arquitetura, seja possível projetar e decompor as regras que levarão à sua formação (KNIGHT, 1994; CELANI *et al*. 2006).

No caso deste estudo, a gramática da forma foi utilizada para gerar formatos, posições e tamanhos dos cômodos. Como resultado, optou-se por elaborar uma gramática da forma paramétrica (CELANI *et al.* 2006) em um formato esquemático, visando compreender as diferentes regras que viabilizam a composição de um leiaute residencial de interesse social. Nesse tipo de sistema, algumas de suas métricas são variáveis, o que permite que um grande conjunto de composições seja gerado a partir de poucas regras. Este conjunto de regras coordena a posição dos espaços, orientando como um deve se conectar com o outro, desse modo, possibilita que a composição mantenha uma lógica estrutural, mesmo apresentando diferentes combinações.

A busca estocástica é um modelo baseado em conceitos de probabilidade e eventos aleatórios que são plausíveis de ocorrer em determinado tempo e de acordo com certos parâmetros (KNILL 2009). Sua utilização possibilita que uma série de variáveis randômicas sejam organizadas em um determinado tempo e espaço. A ordenação dos dados ou geometrias é feita por eventos aleatórios, dinâmicos e imprevisíveis (EL DALY, 2009).

O uso da busca estocástica foi implementado na programação visando gerar automaticamente a alocação dos cômodos-base — seguindo um conjunto de regras — em uma determinada área delimitada do terreno, de modo que seus limites não se interseccionam. Assim, a ordenação da composição sempre considerará as regras e espaços já utilizados, não continuando a inserção de novas geometria caso não haja espaço ou entrem em conflito com outras previamente organizadas.

3.3 Métricas de avaliação

O déficit habitacional atual do Brasil supera 6 milhões de moradias e se estipula um aumento de 10 milhões de habitações até 2040. Porém, nos últimos 10 anos, foram entregues cerca de 850 mil unidades de habitação de interesse social (HIS) (GIVISIEZ e OLIVEIRA, 2018). Apesar da expressividade dos números, diversos estudos apontam para a baixa qualidade das moradias. Esse aspecto pode estar relacionado à não consideração de características de diversidade cultural e ambiental das diferentes regiões do país (BORTOLI; VILLA, 2020). Assim, a presente pesquisa adotou não só aspectos econômicos para o desenvolvimento do processo, mas também alguns critérios que estão sendo aprofundados pela NBR 15.575, como considerar o clima local, a quantidade de luz do dia e a radiação consequente de um determinado entorno urbano.

3.3.1 Custo Unitário Básico e Custo Unitário Geométrico

A produção de um projeto arquitetônico exige diferentes etapas, sendo estas avaliadas e validadas por arquitetos e engenheiros no decorrer do processo. (MORAES; PICCHI; GRANJA, 2016). Existem diversos sistemas de custo elaborados por órgãos federais e grupos empresariais que fornecem informações e estimativas para quantificar o valor da obra no Brasil. Contudo, nas fases iniciais de projeto, poucas informações são repassadas aos modelos, que apresentam um nível baixo de detalhamento, isto significa serem gerados orçamentos pouco precisos quando associados a modelos que utilizam a unidade construída. (MASCARÓ; 1985). Cotidianamente quando nos referimos ao custo da construção para realização de orçamentos no Brasil, estamos considerando o custo unitário básico (CUB), valor multiplicado pelo cálculo da área equivalente da construção (LIMA *et al*., 2016).

Segundo Gonçalves e Ceotto (2014) o CUB apresenta somente uma variável para o cálculo do preço da unidade, podendo ser uma ferramenta sem variações e pouco confiável. Lima *et al.* (2013) afirmam que diferentes configurações e características presentes no projeto podem alterar as estimativas do preço da construção. Da mesma forma, Mascaró (1985) descreve uma série de indicadores que não são utilizados para a sugestão de preço empregada pelo CUB. Assim, temos diferentes características como forma, altura e as compartimentações do edifício, que trazem mudanças significativas no valor de uma construção que apresenta a mesma área.

Uma alternativa para mensurar o custo da construção buscando maior precisão dos possíveis valores durante a fase de projeto ou do estudo é o custo unitário geométrico (CUG). Os dados de entrada do método do Custo Unitário Geométrico são ajustáveis em variáveis descritas como independentes, e que após descobertas, são lançadas em uma equação que permite chegar na variável dependente: o custo por metro quadrado da construção. Para alcançar as variáveis independentes, são necessários quatro processos matemáticos, sendo: X1 é igual à divisão entre a área total de parede externa pela área total construída; X2 é a área total de parede interna dividida pela área construída; X3 é a área molhada dividida pela construída; e X7 pode variar conforme o padrão da construção, sendo 0,1624050 para padrões altos, 0 para padrões normais e -0,437 75848 para padrões baixos. Esses valores são dispostos na Eq. 1, que no que lhe concerne, possibilita identificar um valor estimado do metro quadrado (LIMA 2013; LIMA *et al*., 2013).

$$Y = 808.84296 * e(0{,}97266795 * X1) * e(0{,}13635413 * X2) * e(-0{,}003251045 ** 1/X3) * e(0{,}99294145 * X7) \quad (1)$$

O valor padrão da fórmula é de 481.60837 sendo utilizado por Lima *et al*. (2013) e Lima (2013) com base no CUB do Rio de Janeiro de abril de 2012. Em trabalhos como o de LIMA *et al*. (2016) o valor padrão do CUG é aplicado em uma tabela comercial, mas não é descrito o método utilizado. Para esse ajuste, empregou-se o INCC (FGV IBRE, 2020) Índice Nacional da Construção Civil com a finalidade de avaliar os reajustes dos valores, por mês, das construções. Com base nisso, o resultado utilizado na programação foi de um índice de variação de 1,679462 que multiplicado por 481.60837 resultou em 808.84296. A partir dessa variável atualizada da equação de Lima (2013), foi adaptada para equação 1, em que: Y = Valor do metro quadrado (m²); X1 = Área total de parede externa dividida pela área total construída; X2 = Área total de parede interna dividido pela área construída; X3 = Área molhada dividida pela área construída; X7 = Variável conforme o padrão da construção.

3.3.2 Simulação da luz do dia

A exigência de comprovação de desempenho nas edificações faz com que novas tecnologias computacionais sejam desenvolvidas almejando maior precisão na reprodução da realidade. A utilização de simulação em processos paramétricos e generativos permite que as diferentes composições características criadas pelo programa passem por uma rápida exploração e verificação das inúmeras alternativas compositivas. Dessa forma, aumentam as possibilidades de investigação de diferentes variáveis para avaliações de diversos fenômenos relacionados à iluminação natural (JAKUBIEC e REINHART, 2011). Esses avanços são especialmente úteis no contexto atual em que a iluminação natural é avaliada com base em dados climáticos. No entanto, esta estratégia depende de um grande esforço computacional, pois as simulações

realizadas para a luz do dia são mais precisas quando executadas de forma dinâmica, utilizando as horas de luz durante um ano completo. Este processo se dá por um modelo preditivo chamado *Climate Based Daylight Modelling*. A partir de um CBDM, é possível selecionar as horas de luz do dia em um intervalo de tempo, de modo a capturar a dinâmica diária e sazonal da luz natural (MARDALJEVIC e CHRISTOFFERSEN, 2017).

No caso da implementação do modelo performativo multicritério, optou-se pela utilização de uma métrica descrita pela IES (2012) — I*lluminating Engineering Society of North Americ* — para avaliar a luz solar em simulações dinâmicas do *daylight autonomy*. O DA é descrito como uma porcentagem do espaço que atinge a iluminância, em uma determinada quantidade de lux, em 50% das horas de utilização do ambiente durante a análise, em um período de um ano. Sua avaliação é feita, em média, durante 10 horas por dia, totalizando 3650 horas de análise, dependendo do arquivo climático.

De modo a comprovar a eficiência do desempenho lumínico, as simulações tiveram como alvo as métricas descritas em Vasquez *et al*. (2021) em que há um valor mínimo, intermediário e superior para descriminar o ambiente. No estudo de Pereira *et al*. (2020) são apresentados os alvos e os métodos para a atualização da norma de desempenho lumínico no Brasil, por meio da NBR 15.757. Os alvos buscam pelo menos 200 luxes em uma porcentagem do espaço, considerando nível de desempenho: superiores 70% da área, intermediário 55% e inferior acima de 40%.

As simulações foram implementadas utilizando dois plugins, o ClimateStudio, para a verificação do *daylight autonomy* e o Ladybug, para a verificação da radiação anual incidente nas fachadas (Ladybug_Radiantion_map). Nos componentes do ClimateStudio é possível escolher a iluminação alvo. Para a utilização destes plugins alguns parâmetros foram ajustados, como as reflexões das superfícies: 20% para os pisos; 50% para as paredes; e 80% para o teto. Além disso, as propriedades ajustadas das simulações foram as seguintes: 6 Inter reflexões do ambiente; 1024 divisões do ambiente; 256 amostragens do ambiente; 0,1 de precisão do ambiente; 256 para a resolução do ambiente; 0 de limiar direto; e 0 de amostragem direta.

4. CONSTRUÇÃO DO PROCESSO

Os conhecimentos teóricos e as ferramentas computacionais descritas foram utilizados de base para a construção do processo desenvolvido em quatro etapas distintas com objetivos independentes. Em um primeiro momento, delimita-se parametricamente o tamanho do terreno e os afastamentos legais. Na sequência, são organizados os espaços e seus respectivos tamanhos de modo a assemelhar a composição a uma residência unifamiliar de interesse social (regras da gramática da forma). Na fase seguinte, diferentes elementos arquitetônicos são adicionados à composição, como paredes, lajes, janelas, portas, beirais, telhados e um entorno urbano no perímetro aproximado. Por fim, o modelo tem diferentes parâmetros simulados, incluindo a previsão do orçamento, a distribuição da luz do dia e a visualização da radiação incidente nas fachadas. A Figura 2 apresenta a sequência da estrutura lógica utilizada na construção do processo, com amostras aleatórias.

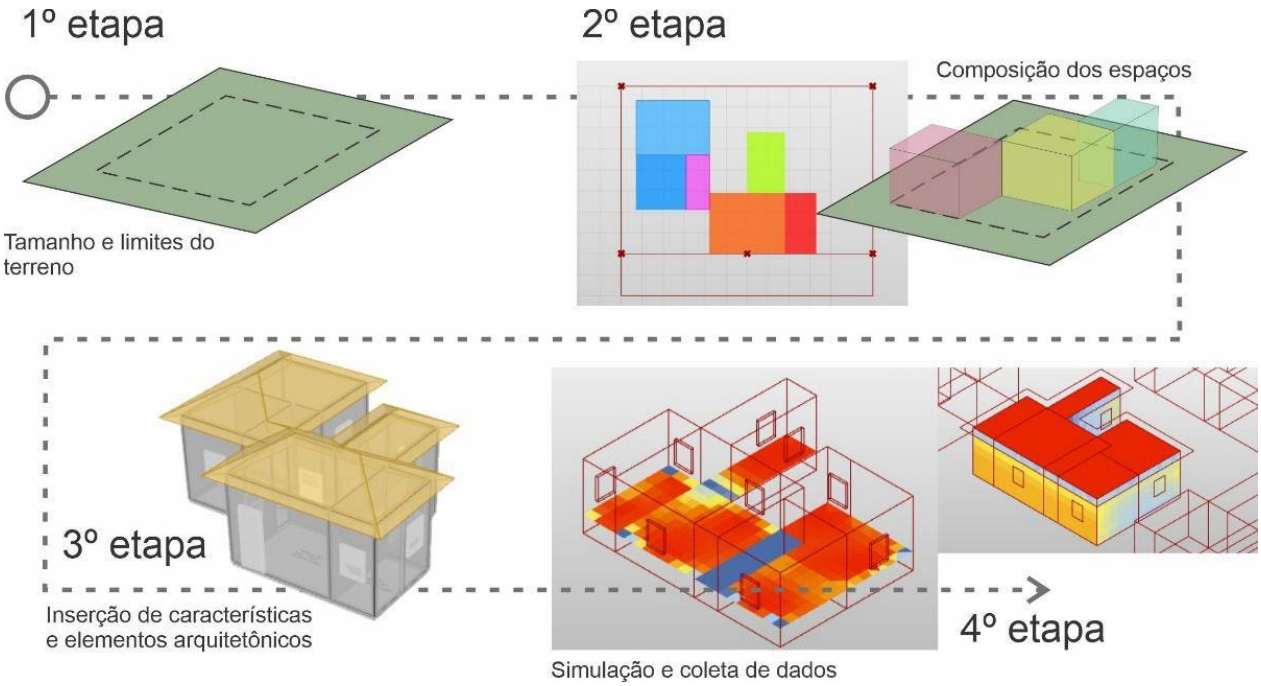


Figura 2 A estrutura da sequência lógica aplicada a programação desenvolvida sendo: a primeira parte da figura a delimitação paramétrica do tamanho do terreno e os afastamentos legais; na sequência, a organização dos espaços e suas dimensões; após a aplicação de diferentes elementos arquitetônicos a composição; e ao final a simulação de diferentes parâmetros. (Fonte: Elaborado pelos autores)

4.1 Parâmetros do lote

A primeira parte da programação visa parametrizar e gerar a visualização das condicionantes urbanísticas e informar as dimensões e a área útil do terreno. Essa etapa foi desenvolvida a partir da linguagem de script C#, utilizando um componente voltado a programação do Grasshopper. Para tal, foram estabelecidas 6 variáveis de entrada: (1) largura do terreno; (2) profundidade do terreno; recuos legais, (3) frontal, (4) lateral e (5) fundos; e (6) um botão booliano para a escolha entre a entrada de afastamentos padrões ou manuais.

Por meio dos parâmetros inseridos é possível calcular as coordenadas cartesianas dos vértices do terreno — considerados sempre retangulares — e dos recuos construtivos. O cálculo dos recuos utiliza de uma estrutura condicional que quando configurada para recuos manuais, subtrai de modo paramétrico os afastamentos das dimensões

do terreno, e quando configurada para recuos padrão, apresenta duas possibilidades:

I. Terrenos com fachada superior a 10 metros de largura: são considerados recuos 4 metros para frontal e 1,5 para os demais;

II. Terrenos com fachada inferior a 10 m de largura: apenas os recuos frontal e de fundos são aplicados, com respectivamente 4 e 1,5 metros.

As informações retiradas dessa etapa permitem visualizar o terreno e coletar suas informações dimensionais, tendo como parâmetros de saída: a largura, profundidade e área do terreno

4.2 Processo compositivo

A segunda etapa, implementada em linguagem de programação visual, utiliza da área demarcada na primeira etapa para criar uma composição formada por quadrados e retângulos, os quais representam os cômodos de uma residência. Para formação dos espaços que simulam os cômodos, utilizaram-se aspectos da legislação brasileira em relação à moradia e ao terreno, presentes na Lei 10.257, de julho de 2001 — Estatuto das Cidades — e ainda, no documento técnico: Como delimitar e regulamentar Zonas Especiais de Interesse Social de 2009, elaborado pela Secretaria Nacional de Habitação e Ministério das cidades.

Ao considerar a realidade do país, optou-se por uma metodologia que priorizasse o acesso à moradia, como a iniciativa Minha Casa Minha Vida (Programa Casa Verde e Amarela, 2021). Assim, para prosseguir a programação, o terreno desenvolvido na etapa anterior foi ajustado para se assemelhar a metragem quadrada destinada à habitação de baixa renda e ocupações irregulares, chamadas Zonas de Interesse Social — ZEIS. Nesta categoria de ocupação, a metragem do terreno vária entre 60m2 e 300m2, com a média nacional de 180m2 (SECRETARIA NACIONAL DE HABITAÇÃO, 2009). No entanto, a lei federal de parcelamento do solo descreve que o lote mínimo padrão deve ser de pelo menos 125m2 (SENADO FEDERAL,2001). Sendo assim, a metragem ajustada nos parâmetros foi de um terreno de 10 m de fachada com profundidade de 12,5 m, totalizando 125m2.

O desenvolvimento da programação inicia a partir da união dos resultados ajustados na etapa anterior com os limites dos terrenos e tamanhos mínimos definidos. Para a geração de diferentes organizações dos ambientes, é utilizada a busca estocástica e a gramática da forma. A primeira delas gera automaticamente o leiaute e a segunda excluem, por restrições baseadas em regras, as composições consideradas inadequadas. Para o desenvolvimento dessa etapa da programação, utilizaram-se gráficos do Grasshopper com o auxílio do plugin Wasp.

Na programação desenvolvida com os componentes do Wasp, estipulou-se um ajuste paramétrico para a quantidade de cômodos que irão compor o leiaute: 1 ou 2 salas; de 1 a 4 dormitórios; de 1 a 2 cozinhas, sendo a segunda considerada área de serviço; e de 1 a 2 banheiros. Conforme apresentado na Tabela 1, a proporção dos ambientes pode ser ajustada parametricamente. Neste caso, essa variação está sempre atrelada ao tamanho do primeiro cômodo, variando sequencialmente a partir de dimensões iguais ou reduzidas. Quanto a escala, esta é ajustada parametricamente por um controlador numérico com o limite máximo de 1. Entende-se, então, que caso o controlador esteja com um número abaixo, a proporção do próximo cômodo será menor que o anterior. Para exemplificar o processo, pode-se considerar que tenha sido selecionada a quantidade de 3 dormitórios, onde o primeiro possui 9 m², e a escala esteja ajustada em 0,85, conforme a sequência, o segundo possuirá 7,65 m² e o terceiro 6,50 m². Mas, caso a escala esteja ajustada em 1, então todos os dormitórios apresentarão 9 m².

Tabela 1 Quantidade de cômodos parametricamente ajustáveis.

Tipo de cômodo	Quantidade	Dimensões
Dormitório	De 1 a 4	X = 2.5 a 3.2; Y = 2.3 a 3
Salas	De 1 a 2	X = 2.5 a 4; Y = 2.5 a 4
Cozinha	De 1 a 2 (sendo a segunda considerada área de serviço)	X = ao X da sala; Y = 1.2 a 2.5
Banheiro	De 1 a 2	X = 1.2 a 1.6; Y = 2.5 a 3.2

(Fonte: Elaborado pelos autores)

As regras que compõem a gramática funcionam em uma sequência, onde os cômodos seguem uma lógica para o seu posicionamento, de modo que nunca compartilhem um mesmo espaço. As regras devem considerar as seguintes restrições compositivas:

I. Adição da sala: inicialmente o ambiente principal é alocado a partir de um ponto parametricamente ajustável em relação à linha do afastamento frontal, e caso sejam adicionadas duas salas, a próxima se posiciona com um dos lados coincidentes com o da primeira;

II. Inserção da circulação: sua área é ajustada conforme a quantidade de quartos definida no início da geração;

III. Disposição dos quartos ao longo da circulação: caso haja mais de 3 quartos, dois deles irão apresentar lados coincidentes;

IV. Ajustes na circulação: após a inserção dos quartos são realizadas adaptações na circulação visando aumentar a áreas dos dormitórios e reduzir a de circulação;

V. Adição do ambiente cozinha: é alocada próxima à primeira sala, e se houver dois ambientes denominados cozinha, o segunda passa a ser considerado área de serviço, fazendo limite com o outro ambiente;

VI. Inserção dos banheiros: o primeiro sempre junto a uma das salas, e o outro, quando necessário, próximo ao corredor ou junto ao primeiro quarto.

A Figura 3 contém um exemplo de aplicação da regra de conexão entre os ambientes. E a Figura 4 apresenta a sequência das regras utilizadas no desenvolvimento da programação

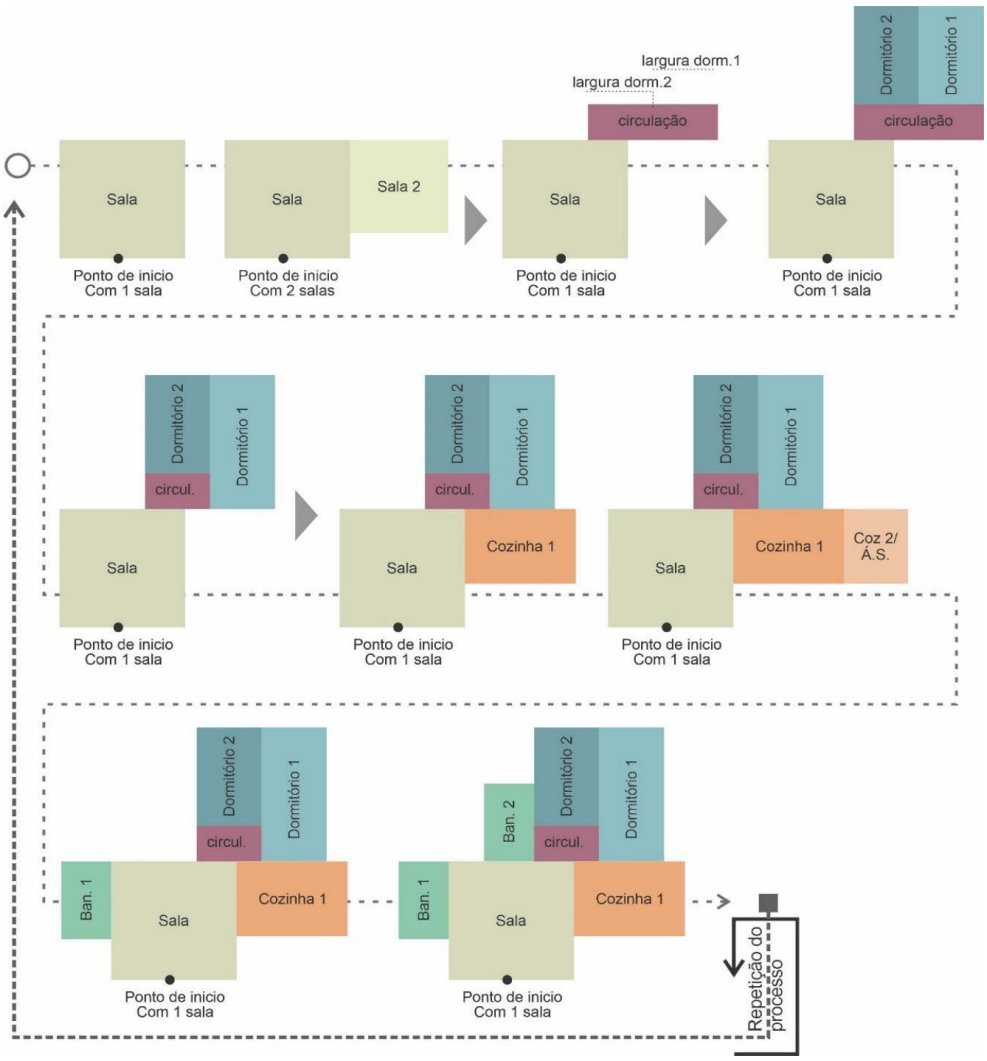


Figura 3 Um exemplo da sequência completa do emprego das regras apresentadas na figura 4. (Fonte: Elaborado pelos autores)

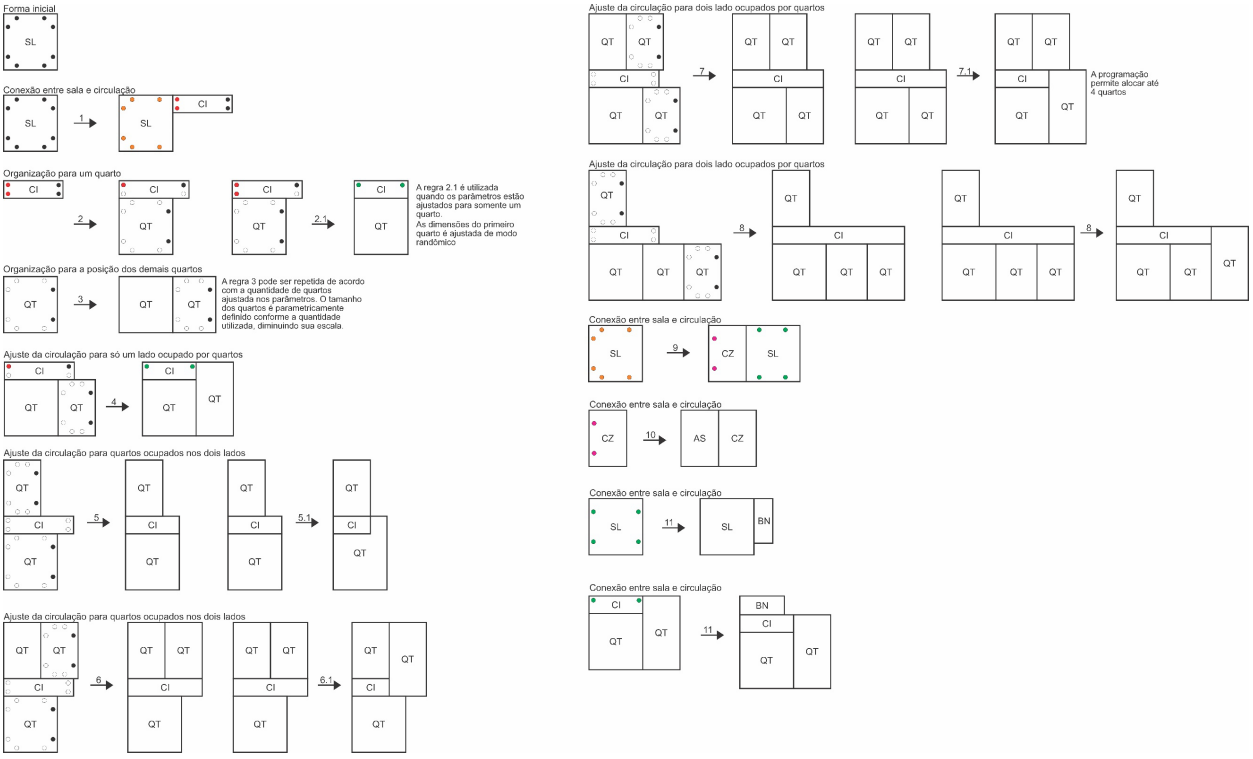


Figura 4 Apresentação da sequência das regras utilizadas no desenvolvimento da programação. Elas são aplicadas no método da busca estocástica, que só possibilita que uma regra seja executada caso ela não interfira no espaço de outra já implementada. (Fonte: Elaborado pelos autores)

A aplicação de regras de uma gramática da forma baseia-se na identificação da forma geométrica que está presente do lado esquerdo de uma regra. Contudo, ao longo do processo de aplicação surgem novas formas, tornando um problema complexo programar o algoritmo para que este selecione a forma em que a regra deve ser aplicada ou evite que uma forma se sobreponha a outras inseridas em passos anteriores do processo de geração. Para evitar a sobreposição de ambientes durante o processo de composição, o plugin Wasp é utilizado para implementar uma estratégia de busca estocástica, impedindo que cômodos diferentes ocupem uma mesma posição. Além disso, para que os espaços sempre estejam posicionados logicamente (seguindo alinhamentos estruturais e buscando evitar espaços estreitos ou estrangulamentos externos) a restrição que os rege faz com que se conectem sempre a 0,60 m de distância de suas arestas. Tais regras foram detalhadas por códigos escritos em cada uma das etapas do Wasp, buscando por um número maior de composições, bem como diferentes posições para os cômodos. Na Figura 5, é possível observar uma amostra do funcionamento dessas regras.

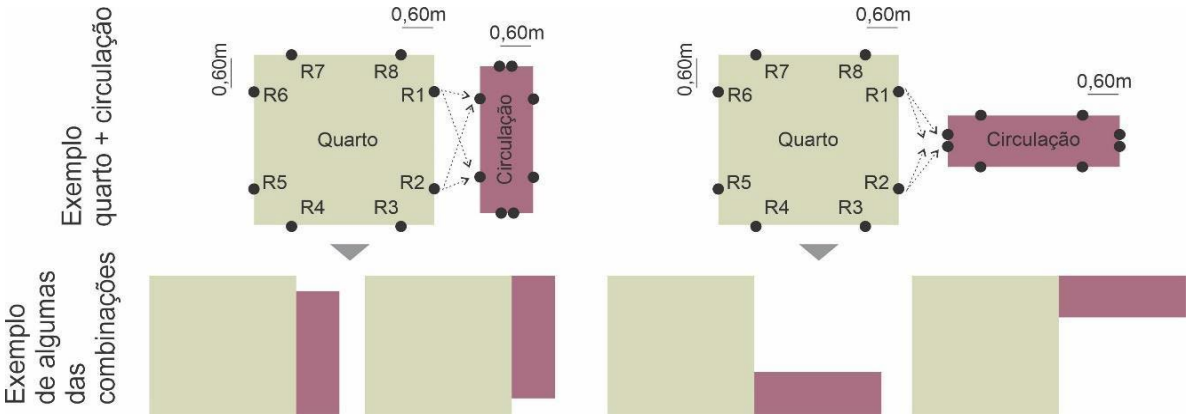


Figura 5 Exemplo de uma aplicação das regras utilizadas de modo que mantenham o alinhamento estrutural da forma. Sempre aproximando os cômodos a serem anexados na implementação da regra a 0,60m do canto mais próximo. (Fonte: Elaborado pelos autores).

A etapa de geração de composições é controlada por um botão booliano que, ao ser acionado, reinicia o processo compositivo. A partir da aplicação contínua do algoritmo é possível criar inúmeras disposições de cômodos. No entanto, apesar das restrições descritas acima, inúmeras destas composições inicialmente apresentavam características visuais que não se assemelhavam a um leiaute de uma residência, exigindo assim uma fase de refinamento do processo.

O processo de refinamento ocorreu por meio da definição dos parâmetros relacionados à quantidade de ambientes com base na proposta do concurso do CAU-SC para habitação de interesse social. (2 dormitórios, 1 sala, 1 cozinha e 1 banheiro). O procedimento aplicado aconteceu em quatro ciclos, nos quais se buscou o aprimoramento das regras implementadas na programação a partir da experiência e conhecimento de estudantes e profissionais de arquitetura e urbanismo (MARIANO, 2021). Dessa forma, nos dois primeiros ciclos, a cada rodada, três acadêmicos (de uma disciplina de pós-graduação) observaram um conjunto de resultados de composições geradas aleatoriamente, conforme as seguintes características:

I. Grupo 1: vinte composições em um terreno de 12m × 30m, iniciando o arranjo no ponto central

II. Grupo 2: vinte composições em um terreno com as mesmas dimensões, mas com o ponto de início a 1/3 do limite lateral;

III. Grupo 3: vinte composições, neste caso, em um terreno de 18m × 35m — com a composição iniciando no ponto central.

Os participantes observaram a configuração dos espaços e validaram a semelhança com um leiaute de uma residência unifamiliar, nos casos em que o parecer era negativo, uma justificativa foi descrita. O processo foi realizado em dois ciclos, sendo que entre cada um deles as observações foram implementadas no algoritmo de geração.

Após esta etapa inicial de refinamento, foi realizado mais um ciclo de geração de vinte composições, contudo, com novos parâmetros de dimensão de terreno (12.5m x 20m) baseados nas recomendações presentes no Estatuto da Cidade (2001). O eixo inicial da composição foi delimitado como o centro do limite frontal. O método de avaliação utilizado no ciclo anterior foi repetido, reduzindo ainda mais o número de composições consideradas inadequadas.

Por fim, após os ajustes realizados a partir das análises anteriores, para o quarto e último ciclo, foram avaliadas por arquitetos mais de 100 composições que se aproximavam de leiautes de residências unifamiliares em um terreno que corresponde à área mínima estipulada pelo governo federal brasileiro.

Na última avaliação, das 100 composições geradas pelo algoritmo, 12 ainda apresentavam alguma característica que comprometeria a lógica de um leiaute residencial unifamiliar. O processo completo de refinamento compositivo envolveu a geração de 240 composições. Sua aplicação poderia ter sido realizada em um número maior de ciclos, porém, isso poderia restringir o surgimento de soluções viáveis e inesperadas. A Figura 6 demonstra a estrutura de testes utilizada para refinar esta parte da programação. Na Figura 7, é possível visualizar os resultados de cada uma das rodadas de teste, apresentando a percentagem de amostras que se assemelha à configuração de uma residência unifamiliar e as principais deficiências observadas pelos participantes em cada rodada que necessitam ter suas regras modificadas. E, na sequência, uma amostra desses testes pode ser observada na Figura 8, que contém um resumo dos resultados obtidos em cada uma dessas rodadas.

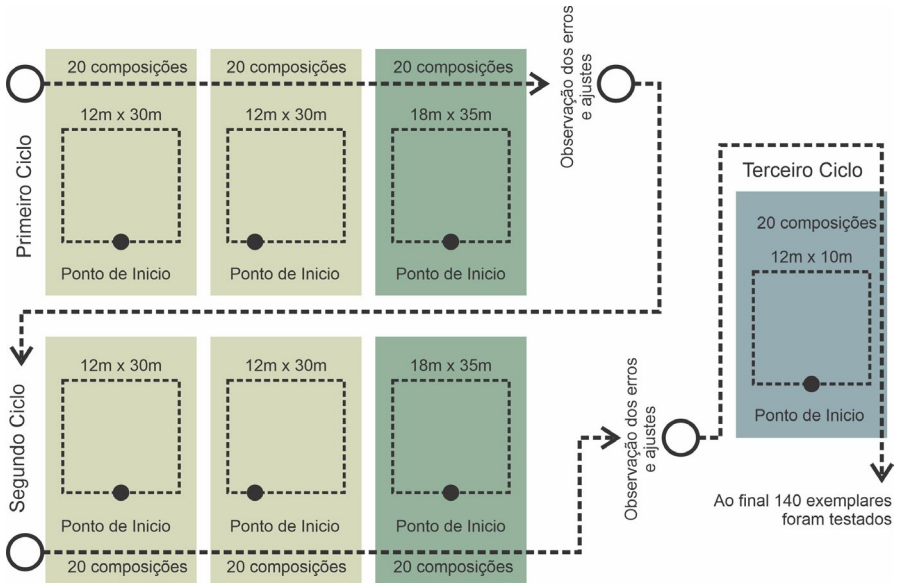


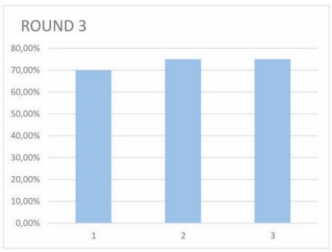
Figura 6 Estrutura de testes utilizada para o refinamento desta parte da programação, apresentando os.3 primeiros ciclos de teste e a rodada final com um maior número de exemplares (Fonte: Elaborado pelos autores).

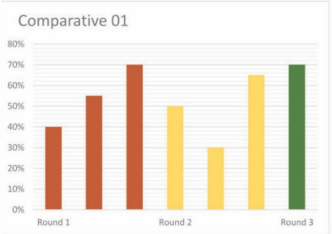
N	Rodada 01 12x30 (1/2)			Rodada 01 12x30 (1/3)			Rodada 01 18x35 (1/3)		
	BRU	MIR	PED	BRU	MIR	PED	BRU	MIR	PED
1	N	N	S	N	N	N	S	N	S
2	S	S	N	S	N	N	S	N	S
3	N	N	S	S	S	S	S	S	S
4	N	N	N	S	N	N	S	S	S
5	S	S	S	S	S	S	S	S	S
6	N	N	N	S	S	S	S	S	S
7	S	S	S	S	N	S	S	S	S
8	N	N	N	N	N	N	S	S	S
9	N	N	N	S	S	S	S	S	S
10	N	N	N	N	N	N	S	S	S
11	N	N	N	S	N	N	N	S	S
12	N	N	N	N	N	N	N	N	S
13	N	S	S	N	N	N	N	N	N
14	S	N	N	S	S	S	S	S	S
15	S	N	N	N	N	N	S	S	S
16	N	N	S	S	N	S	N	S	S
17	N	S	N	N	S	N	S	N	S
18	S	S	S	S	S	S	N	N	S
19	S	S	S	N	N	N	S	S	S
20	S	S	S	N	N	N	N	N	S
Positivos	40%	40%	45%	55%	35%	40%	70%	65%	95%
Média P.	42%			43%			76%		
Carac. Negativas	Espaços não preenchidos		25,00%	Espaços não preenchidos		0,00%	Espaços não preenchidos		0,00%
	Forma não comum		16,16%	Forma não comum		11,11%	Forma não comum		100,00%
	Falta de quartos		58,33%	Falta de quartos		88,80%	Falta de quartos		0,00%
			99,49%			99,91%			100,00%

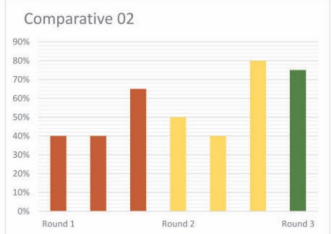
N	Rodada 02 12x30 (1/2)			Rodada 02 12x30 (1/3)			Rodada 02 18x35 (1/3)		
	BRU	MIR	PED	BRU	MIR	PED	BRU	MIR	PED
1	N	N	N	N	N	N	N	N	N
2	N	N	N	S	S	S	N	N	S
3	S	S	S	S	S	S	S	S	S
4	S	S	S	S	S	S	S	S	S
5	N	N	N	N	N	N	N	S	S
6	N	N	N	N	N	N	N	S	S
7	N	N	N	N	N	N	S	S	S
8	N	N	N	S	S	S	N	S	N
9	S	S	S	N	S	S	N	N	S
10	N	N	N	N	N	N	S	S	S
11	S	S	S	N	N	N	S	S	S
12	N	N	N	N	N	N	S	S	S
13	S	S	S	N	N	N	N	S	S
14	S	S	S	N	S	S	S	N	S
15	N	N	N	S	S	S	S	S	S
16	S	S	S	N	S	S	S	S	S
17	N	N	N	S	S	S	S	S	S
18	S	S	S	N	N	N	S	S	S
19	S	S	S	N	N	N	S	S	S
20	S	S	S	N	N	N	S	S	S
Positivos	50%	50%	50%	30%	40%	45%	65%	80%	90%
Média P.	50%			38%			78%		
Carac. Negativas	Ban. sem conx.		10,00%	Ban. sem conx.		21,40%	Ban. sem conx.		71,42%
	Espaços não preenchidos		0,00%	Espaços não preenchidos		0,00%	Espaços não preenchidos		0,00%
	Forma não comum		0,00%	Forma não comum		0,00%	Forma não comum		28,50%
	Falta de quartos		90,00%	Falta de quartos		78,50%	Falta de quartos		0,00%
			100,00%			99,90%			99,92%

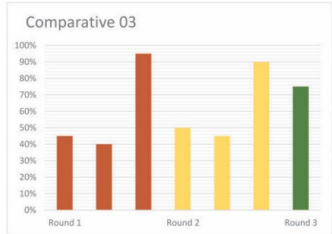












Rodada 03 12x10 (1/2)		
BRU	MIR	PED
S	S	S
S	S	S
S	S	S
S	S	S
N	N	N
S	S	S
S	N	N
N	N	N
S	S	S
S	S	S
S	S	S
S	S	S
S	S	S
N	N	N
N	N	N
N	S	S
S	S	S
S	S	S
S	S	S
N	S	S
70%	75%	75%
73%		
Ban. sem conx.		50,00%
Espaços não preenchidos		0,00%
Forma não comum		50,00%
Falta de quartos		0,00%
		100,00%

Figura 7 Resultados de cada uma das rodadas de teste, apresentando a percentagem de amostras que se assemelham a configuração de uma residência unifamiliar – marcados com um "S" os que se assemelham e "N" os que não-, e as principais deficiências visualizadas pelos participantes em cada rodada que necessitam ter suas regras modificadas. (Fonte: Elaborado pelos autores).

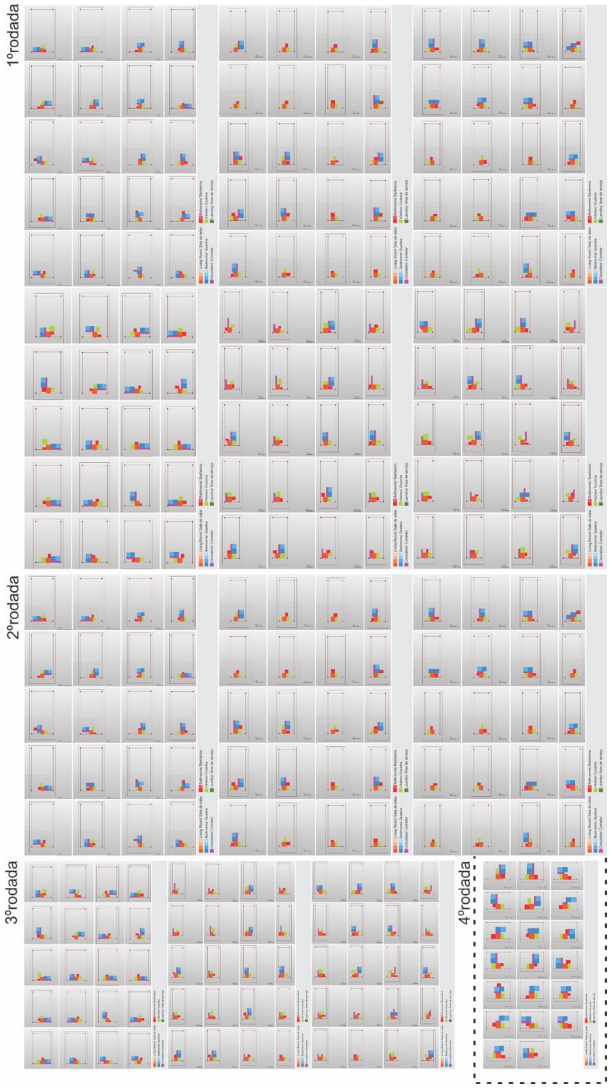


Figura 8 Resumo com os exemplos desenvolvidos pelo algoritmo em cada uma das etapas de teste (Fonte: Elaborado pelos autores)

4.3 Diferenciação em classes arquitetônicas

Após o final do processo de ajustes de leiautes, uma nova etapa inicia-se visando aproximar a composição de ambientes representada por um *grid* de retângulos a um modelo digital de uma residência unifamiliar. Este processo ocorre por meio da diferenciação dos elementos geométricos baseados em linhas e classes de objetos originados do campo da arquitetura e construção. À vista disso, novas informações foram inseridas a partir da utilização do aplicativo de autoria BIM VisualArq. Esta plataforma utiliza o ambiente do Editor de algoritmos Visual Grasshopper como meio para transformar um modelo baseado em entidades geométricas em um modelo BIM.

No caso desta pesquisa, nas linhas que representam os limites dos ambientes, foram geradas instâncias baseadas na classe parede. Estas paredes foram divididas em dois grupos diferentes (internas e externas), cada um com características individuais diferentes.

Em uma etapa seguinte, foram adicionados aos ambientes as aberturas (janelas). No caso deste elemento arquitetônico, criou-se uma regra para a sua inserção: uma janela é sempre adicionada a cada duas divisões externas do cômodo. Por exemplo, se um cômodo possui 3 divisões com o espaço interno, há a possibilidade de que uma ou duas das paredes recebam uma janela, assim como se outro cômodo possui 2 divisões, há somente a possibilidade de que uma das paredes receba uma abertura. Para os casos em que é necessário escolher uma das paredes, existe um botão binário que seleciona as ímpares ou pares. Esta opção foi necessária, pois caso um cômodo seja criado com apenas uma divisória externa, ela poderá ser ajustada para receber uma abertura. A Figura 9 exemplifica estas possibilidades de alteração.

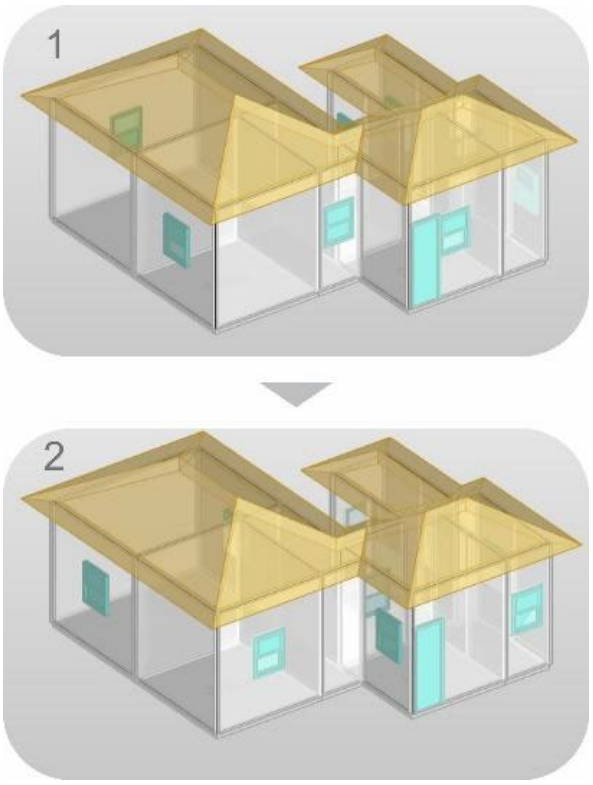


Figura 9 Demonstração de como as janelas podem ter sua posição alterada de uma divisória para outra, segundo uma função booleana. (Fonte: Elaborado pelos autores)

O tamanho das esquadrias no modelo foi ajustado para: peitoril de 1,10m, largura de 0,80m e altura de 1,0m. Essas dimensões foram escolhidas considerando os casos nos quais a abertura seja posicionada na circulação, que apresenta 1,20 m de largura. Com isso, a janela não entra em conflito com as paredes próximas, e caso o modelo seja detalhado em outras etapas de projeto, ainda haveria espaço para a inserção de marcos e golas. A Figura 10 apresenta a configuração da janela utilizada quando posicionada no corredor.

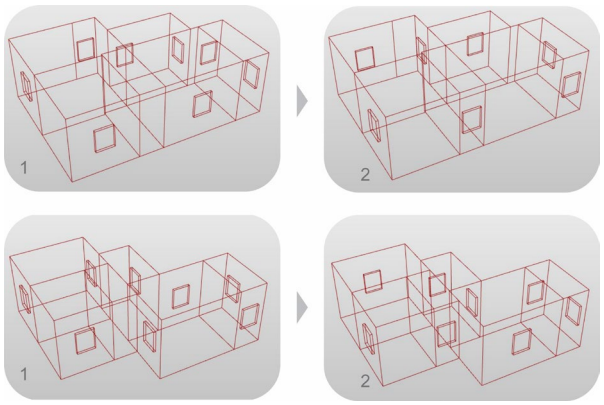


Figura 10 Demonstração de como as janelas podem ser ajustadas para disponibilizarem luz do dia para a circulação. A lógica que estrutura essa mudança é a mesma apresentada pela figura 9, uma operação booleana. (Fonte: Elaborado pelos autores)

Outro elemento arquitetônico a ser diferenciado a partir das linhas que formam o leiaute é a laje. Esta é elaborada a

partir da curva que contorna a casa e pode ter seus parâmetros definidos de acordo com a necessidade do projeto. Por meio dessa mesma curva de contorno, também é instanciada a cobertura no formato de um telhado de múltiplas águas. A sua construção apresenta importância devido ao sombreamento proporcionado pelo beiral, que pode influenciar na eficiência térmica e lumínica da residência. Como resultado, as definições de extensão foram consideradas mais relevantes que outras características, como materiais e a forma. Outros parâmetros da cobertura como a altura e posicionamento da cumeeira são orientados conforme a composição dos espaços e por outros parâmetros definidos na programação, como o ângulo de inclinação das águas (16,7º, que corresponde a 30%).

4.4 Simulação multicritério: custo, iluminação e radiação

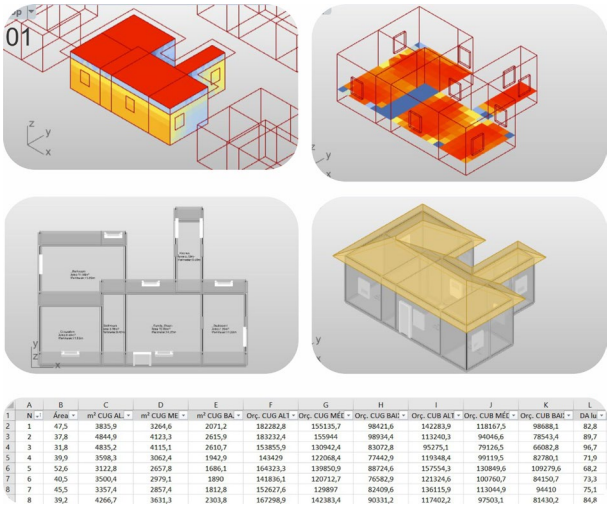
Após instanciar os elementos arquitetônicos a partir dos diferentes leiautes gerados, parte-se para a etapa de verificação da performance a partir de um processo de simulação de métricas pertencentes aos critérios de avaliação custo, iluminação e radiação:

I. Previsão orçamentária (CUG e CUB): a simulação para obtenção de um orçamento prévio foi planejada para fazer um contraponto na escolha de uma determinada composição, podendo ser utilizada para adequar o tamanho e a forma da arquitetura escolhida. Para isso, foram utilizados dois métodos, um que avalia os custos por meio de diferentes características do ambiente, o CUG, e o outro pela metragem quadrada total, o CUB. Ambos foram calculados segundo os padrões residenciais baixo, médio e alto. Os resultados dessas simulações são obtidos por equações matemáticas construídas com os componentes do Grasshopper. Em relação aos valores utilizados, estes foram referenciados conforme a tabela do Sinduscon (2021) de Santa Catarina para o mês de julho e agosto de 2021.

II. Distribuição da luz do dia: foi analisada por meio da plataforma ClimateStudio, e assim como as outras simulações, utilizou-se das geometrias e características simplificadas do modelo. O *Daylight Available* (DA) foi utilizado como métrica de simulação pois possibilita avaliar a porcentagem da área em que um espaço tem um bom desempenho da luz do dia. Ainda sobre este processo, as métricas para a simulação seguiram as descritas por Vasquez *et al*. (2021) e Pereira *et al*. (2020) que apresentam as características e alvos para avaliações da luz do dia.

III. Visualização da radiação incidente nas fachadas: A visualização da radiação incidente é feita por meio dos componentes do plugin Ladybug, que possibilitam a visualização da radiação média anual — em Kw/h — das fachadas. Para essa avaliação, recriou-se um entorno urbano nas imediações para aproximar o modelo de um cenário real. Esta situação foi obtida copiando o modelo e posicionando nos fundos e laterais do lote. Os resultados da avaliação foram interpretados de maneira visual.

Os resultados obtidos a partir das diferentes simulações foram exportados para uma planilha eletrônica. No caso da previsão orçamentária, os resultados alcançados com os valores do custo do m², assim como o possível valor da obra, nos dois métodos e três padrões, foram repassados por meio do plugin Colibri. A Figura 11 apresenta como cada composição é visualizada na plataforma Rhinoceros 3D e como os resultados podem ser verificados na tabela do Excel.



	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	N	Área	m² CUG AL	m² CUG ME	m² CUG BA	Orç. CUG ALT	Orç. CUG MÉD	Orç. CUG BAI	Orç. CUB ALT	Orç. CUB MÉD	Orç. CUB BAI	DA lu
2	1	47,5	3835,9	3264,6	2071,2	182282,8	155135,7	98421,6	142283,9	118167,5	98688,1	82,8
3	2	37,8	4844,9	4123,3	2615,9	183232,4	155944	98934,4	113240,3	94046,6	78543,4	89,7
4	3	31,8	4835,2	4115,1	2610,7	153855,9	130942,4	83072,8	95275,1	79126,5	66082,8	96,7
5	4	39,9	3598,3	3062,4	1942,9	143429	122068,4	77442,9	119348,4	99119,5	82780,1	71,9
6	5	52,6	3122,8	2657,8	1686,1	164323,3	139850,9	88724,6	157554,3	130849,6	109279,6	68,2
7	6	40,5	3500,4	2979,1	1890	141836,1	120712,7	76582,9	121324,6	100760,7	84150,7	73,3
8	7	45,5	3357,4	2857,4	1812,8	152627,6	129897	82409,6	136115,9	113044,9	94410	75,1
9	8	39,2	4266,7	3631,3	2303,8	167298,9	142383,4	90331,2	117402,2	97503,1	81430,2	84,8

Figura 11 O resultado de cada uma das análises feitas pela programação. Na primeira figura superior à esquerda a radiação em Kw/h incidente nas fachadas, sendo avaliada levando-se em consideração um entorno urbano. A direita a distribuição da luz do dia nos ambientes internos (DA). Abaixo à esquerda a metragem dos espaços utilizada para se calcular o CUB e CUG, além de possibilitar a visualização da distribuição dos espaços internos. A direita inferior um exemplo externo do anteprojeto desenvolvido. E por fim, a figura mais abaixo, apresenta os resultados coletados pela Colibri e como são salvos em um arquivo do Excel. (Fonte: Elaborado pelos autores)

5. APLICAÇÃO - SITUAÇÃO DE PROJETO

Com o objetivo de verificar o funcionamento do algoritmo em uma situação real de projeto, os autores geraram uma residência unifamiliar para um concurso de projeto do Conselho de Arquitetura e Urbanismo de Santa Catarina. O programa de necessidades proposto neste concurso era compatível com as métricas definidas no algoritmo: 1 sala, 1 cozinha e área de serviço, 1 banheiro e 2 quartos. Além disso, alguns dos aspectos solicitados pelo edital, e que deveriam ser considerados no projeto, poderiam ser analisados pelas simulações, tais como: funcionalidade, sustentabilidade, desempenho, estética, viabilidade e economia. em relação ao último parâmetro o valor limite de construção da habitação deveria ser de R$ 105.000, considerando todas as etapas, materiais e serviços.

Contudo, havia uma incompatibilidade entre a tipologia gerada a partir do algoritmo proposto e o problema de projeto solicitado no concurso. No último caso, o edital solicita que os módulos projetados se conectem às demais células, permitindo maior flexibilidade tipológica. Isso difere do sistema desenvolvido, pois mesmo com a possibilidade de criar inúmeras composições com a programação, somente um modelo ou um conjunto de módulos poderia ser enviado, limitando, então, a potencialidade do processo. Para tentar solucionar esse problema, posteriormente ao desenvolvimento de uma composição, uma solução construtiva foi proposta contendo módulos para facilitar a montagem, bem como o processo de agrupamento, e assim, amenizar a incompatibilidade de resultados.

Seguindo as diretrizes propostas pelo concurso, foi utilizado o processo de geração automatizada e avaliação multicritério para casas unifamiliares de interesse social para gerar uma um conjunto de soluções com diferentes leiautes. Os domínios que controlam as dimensões dos espaços foram ajustados com um determinado intervalo que permitia uma compatibilização estrutural, além de composições de dimensões variadas. Do mesmo modo, outros parâmetros

também foram ajustados para seguir as diretrizes do programa de necessidades, como a quantidade dos cômodos.

Com os parâmetros ajustados, a programação foi rodada 200 vezes, sendo que em cada ciclo, de modo autônomo, o processo criava uma composição com os espaços e conexões estabelecidas no algoritmo. Durante seu funcionamento, informações tridimensionais foram incluídas nessas composições, aproximando o modelo de um objeto arquitetônico, e foram realizadas as simulações de custo, luz natural e radiação.

Destaca-se que todas essas ações foram executadas sem a interferência do projetista, para o qual a única função era iniciar o ciclo. Para que o resultado não se perdesse, e para sua catalogação, a cada ciclo uma captura visual da composição era feita e salva com a mesma numeração das informações do Excel. Esse procedimento foi executado manualmente, e com o aumento da quantidade de exemplares, mostrou-se ineficiente e suscetível a erros. Na Figura 12, pode-se observar uma amostra desses resultados.

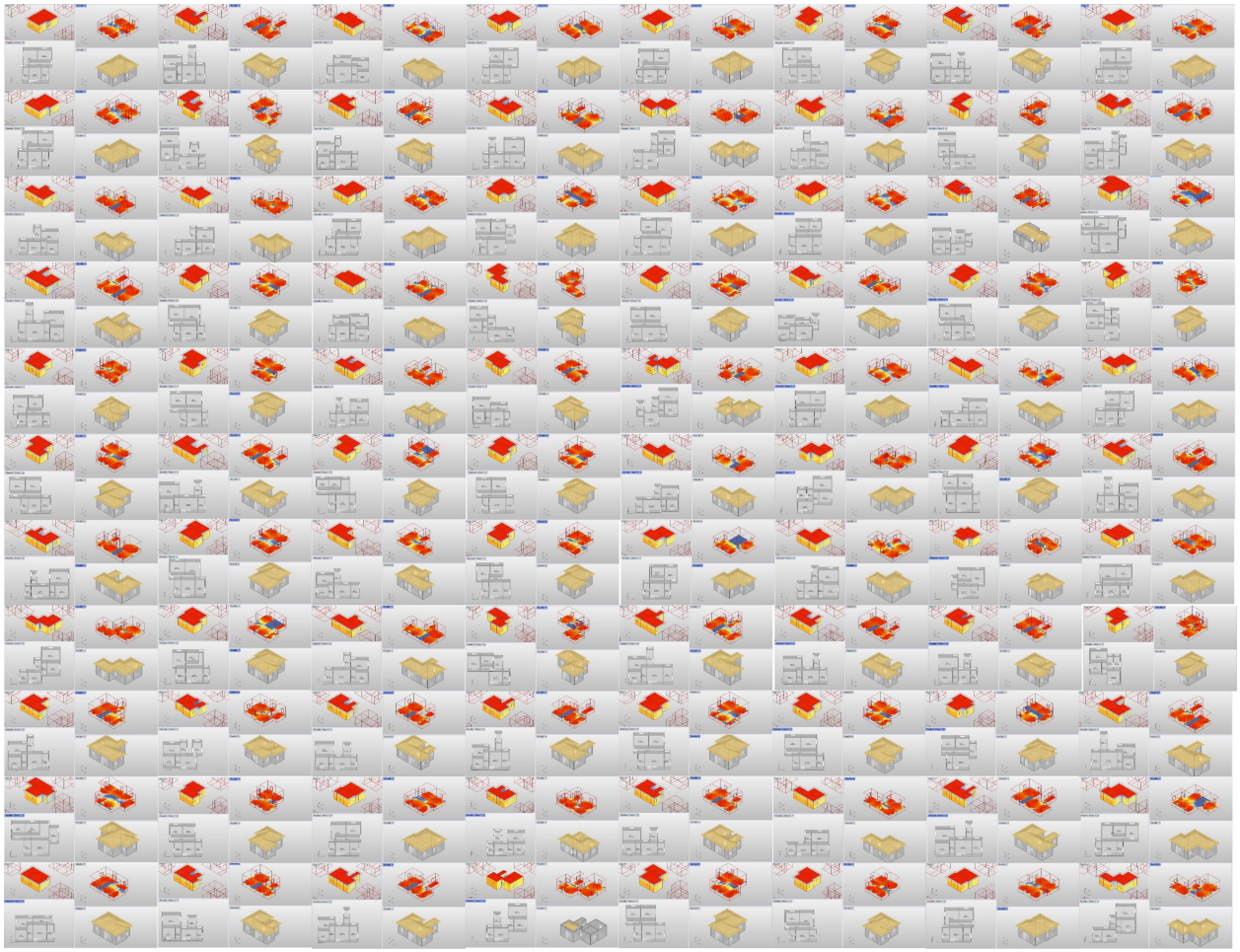


Figura 12 Uma amostra de um conjunto de resultados gerados pela programação no desenvolvimento do concurso de projeto. (Fonte: Elaborado pelos autores)

A partir da obtenção dos 200 exemplares iniciou-se o processo de seleção da proposta por meio de uma avaliação multicritério. Essa etapa foi efetuada de forma analógica por um processo de filtragem. Inicialmente foram selecionadas todas as propostas que estavam na faixa do orçamento estabelecido pelo edital do concurso - R$105.000,00 (cento e cinco mil reais). Deste modo, foram separadas 105 propostas com custo inferior ao definido. O procedimento de seleção aconteceu a partir da filtragem do orçamento total pelo CUG de baixo padrão, tendo como suporte o orçamento do CUB de mesmo nível construtivo. Na sequência, foram escolhidas 50 propostas que apresentavam a maior metragem quadrada segundo o menor custo.

Posteriormente, optou-se por escolher as 20 que apresentavam a melhor distribuição da luz do dia (*Daylight Autonomy*) no ambiente interno. Por fim, foram selecionadas a partir destas propostas, as 5 que apresentavam menor radiação do entorno e linguagem formal com a possibilidade de expansão de novos ambientes — como um dormitório ou loja. Esta foi uma sugestão que estava presente no próprio edital do concurso.

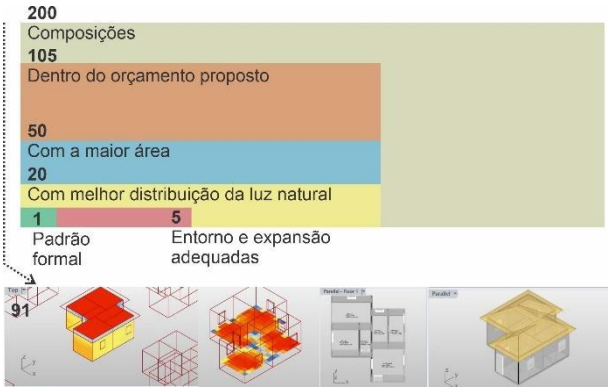


Figura 13 Apresentação resumida de como funcionou o processo de filtragem para a escolha do projeto.As imagens da proposta escolhida e as simulações desenvolvidas pela programação. (Fonte: Elaborado pelos autores)

Dentre as últimas propostas, escolheu-se a que estava mais condizente com os padrões compositivos implícitos à equipe, e que poderiam ser estruturados de modo mais

próximos à realidade. Como resultado, a proposta de número 91 foi escolhida como a mais adequada para detalhamento e continuidade do projeto. A Figura 13 apresenta um resumo de como o processo e a programação funcionaram, e também mostra a proposta escolhida.

6. RESULTADOS

Após a definição do partido, a continuidade do projeto ocorreu por uma estratégia tradicional de projeto, baseada na realização de operações em plataformas de desenho e modelagem. Durante este processo, foram introduzidos os módulos planejados, a infraestrutura dos projetos complementares e ao final, mais uma etapa de simulação.

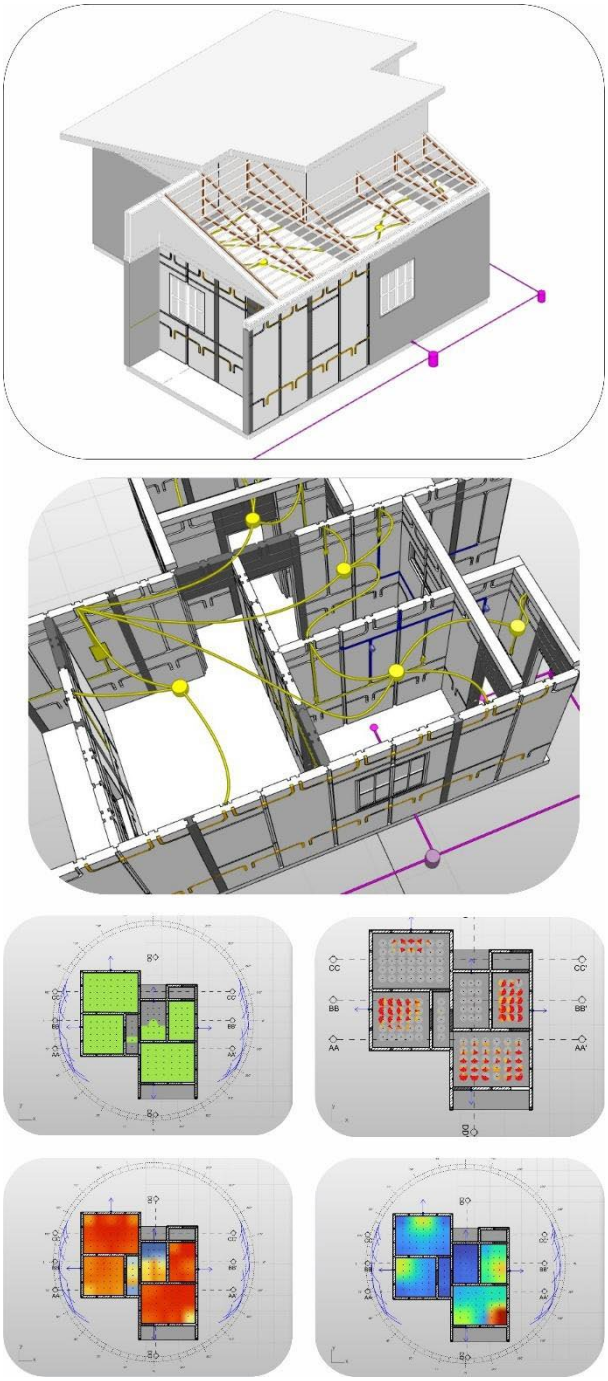


Figura 14 As duas figuras superiores apresentam uma amostra final da proposta desenvolvida, já com os projetos complementares aplicados. E uma segunda rodada de simulações feitas em que foram validados os resultados da primeira. (Fonte: Elaborado pelos autores)

Mesmo não sendo o foco da pesquisa, a continuidade do projeto fora da programação possibilitou verificar a utilização do processo completo dentro de uma perspectiva mais próxima à realidade. Dessa forma, é possível observar se o resultado é compatível com os projetos complementares — hidráulico, hidrossanitário e elétrico — e validar a luz natural no ambiente interno com uma nova simulação.

A Figura 14 apresenta uma amostra final da proposta em um nível anterior, gerado ainda pelo processo automatizado e pela avaliação multicritério, mas com a modulação e projetos complementares. Além disso, pode-se verificar as simulações finais executadas com o projeto em desenvolvimento mais avançado, buscando validar os resultados antes obtidos e verificar outros aspectos como o ofuscamento e locais com possíveis níveis indesejados de luz do dia.

Ao final, a proposta foi encaminhada para os avaliadores do concurso com objetivo de compreender como seria analisado o processo computacional de geração frente a outros métodos de projeto. Na classificação geral, o projeto ficou em vigésimo sétimo lugar entre os cento e oitenta e seis inscritos (habilitados e inabilitados a participar). As avaliações dos ganhadores e finalistas apresentaram pontos interessantes que podem trazer discussões relevantes para implementação de tecnologias e de sua avaliação.

Dentre as considerações é nítida que a influência da plasticidade e urbanidade das propostas foi mais citada do que questões tecnológicas, ambientais ou orçamentárias, aspectos estes, que apresentavam importância no programa de necessidades. Isso pode ser observado em trechos da avaliação dos projetos contemplados com a premiação, como em: “diversificado e com linguagem estética contemporânea”; “sendo que o resultado obtido apresenta espaços internos qualificados e linguagem contemporânea”; “oferece uma linguagem arquitetônica contemporânea”; e “A linguagem arquitetônica é contemporânea, os espaços internos são bem resolvidos e as ambiências geradas são agradáveis”. No entanto, outros termos como custo, orçamento, simulação, tecnologia, etc. em nenhum momento são citados. O termo conforto é citado duas vezes: “Não há um aprofundamento das soluções de conforto ambiental empregadas, bem como da implantação e disposição dos volumes construídos em diferentes arranjos”; e “Não estão muito claras as soluções de conforto ambiental e de acessibilidade empregadas” (CAU-SC, 2022).

7. DISCUSSÕES

Com a experiência de solucionar um problema real de arquitetura por uma programação de geração automatizada multicritério, foi possível trazer a discussão de como o uso das tecnologias computacionais e processos automatizados podem ser aplicados nas práticas atuais de projeto do edifício. Com a possibilidade de comparar a utilização de um processo computacional com outros tradicionais, permitindo-se avaliar pontos positivos e negativos de seu uso.

Os resultados demonstraram que as composições e informações disponibilizadas pela programação permitiram fazer as tomadas de decisões de modo mais assertivo já nas primeiras fases da elaboração do projeto, atendendo aos anseios do arquiteto, mas também respaldado por dados quantitativos e visuais.

O processo desenvolvido demonstrou-se capaz de criar composições para auxiliar projetista e estudantes nas primeiras fases do desenvolvimento de projetos arquitetônicos. A utilização da programação escrita e visual permitiu ampliar a capacidade de criação das composições, visto que foram aplicados diferentes conhecimentos específicos e disciplinas. Como resultado, é possível criar composições mais adaptadas

às dimensões do lote e ao local de implantação, além de possibilitar a avaliação de formas e estruturas ainda não pensadas.

A utilização da programação em uma aplicação mais próxima à realidade demonstrou que sua prática pode expandir a imaginação para composições ainda não planejadas. Nesse sentido, a possibilidade de interpretar diferentes características da composição, auxilia nas tomadas de decisões, que podem não ser baseadas somente na experiência de projeto, mas também na união entre os conhecimentos práticos e os dados simulados, trazendo informações que aproximam o projeto da realidade. A título de exemplo, isso foi vivenciado na escolha da composição após a programação ter gerado 200 modelos, para os quais os critérios especificados pelas simulações foram ponderados antes da identificação visual das composições e formas.

Outro ponto que pode ser avaliado é que a composição cria um jogo de formas que pode ser plasticamente adaptado para a disposição que o projetista considerar ser mais adequada. Dessa forma, é possível aliar aspectos técnicos construtivos e poéticos por meio da tecnologia.

A interpretação dos dados gerados pela programação também pode auxiliar não só profissionais, mas também apoiar estudantes. Sobretudo, nas interpretações a respeito de como a forma da composição do projeto contribui com o custo final da obra, iluminação, radiação, etc. Os resultados encontrados demonstram a importância de aplicar e ensinar práticas de programação e lógica na arquitetura e urbanismo. A crescente utilização de tecnologias, que incluem o uso de programação (visual e escrita), como simulações, é algo que faz parte da rotina da prática de projeto, e quando aplicadas corretamente, podem implicar na melhora de diferentes características do projeto, apresentando composições e resultados quantitativos não previstos pelos projetistas.

Os resultados também permitiram avaliar os pontos positivos e negativos em relação aos processos tradicionais de projeto. Como positivo, tem-se a compreensão explícita dos resultados quantitativos do projeto, por um comentário confiável para a escolha e tomada de decisões. Estas informações, possibilitam filtrar diferentes critérios com a visualização de possíveis partidos arquitetônicos. Com isso, é possível ter uma escolha mais assertiva entre a composição almejada e ótimos resultados performáticos, que, neste caso, referem-se aos orçamentos e à distribuição da luz do dia.

No entanto, o uso do processo computacional se mostrou negativo no que se refere às mudanças estruturais após sua finalização. Como o desenvolvimento e o teste da programação demandam tempo, caso sejam necessárias novas modificações significativas, há um atraso no desenvolvimento da proposta e as simulações acabam não sendo realizadas. Se isso não foi pensado no início do desenvolvimento da programação, tais ajustes podem modificar completamente a estrutura desenvolvida, acarretando perda de tempo utilizado para outra função. Um exemplo disso é a possibilidade da implementação de um segundo andar como resultado do processo. Para processos em métodos tradicionais, uma mudança significativa como essa poderia ser elucidada mais rapidamente, sem a precisão dos resultados gerados pelas simulações, mas a tempo do prazo de envio.

Outra discussão observada no trabalho foi a compreensão de como alguns requisitos são avaliados em trabalhos arquitetônicos no Brasil. Os documentos noticiados e desenvolvidos pelo CAU-SC apresentaram informações que podem auxiliar na interpretação das principais características a serem consideradas nos projetos. Observa-se que as questões formais ainda apresentam uma relevância significativamente maiores as técnicas ou tecnológicas. Com base nisso, os resultados também demonstram que simulações ainda não são usualmente empregadas ou avaliadas. Aspectos normativos, de suma importância para o conforto e longevidade da arquitetura, não foram avaliados com profundidade técnica, demonstrando que os especialistas multidisciplinares também são necessários na avaliação do projeto.

As discussões apresentadas nesse artigo também podem servir de base para a interpretação de termos referentes à tecnologia aplicada à arquitetura. Conforme descrito por Inês, Santos e Leitão (2020) diferentes palavras podem ser utilizadas em um mesmo contexto, mas ainda assim, provocam confusões e falsos significados. Diante disso, a definição do que é uma arquitetura contemporânea permanece em aberto, pois para os avaliadores do concurso ela se concentra nos aspectos estéticos e formais, e não no uso da tecnologia aplicada ao processo de projeto.

Os resultados também mostraram o que ainda precisa ser melhorado na programação, como no caso da adaptabilidade modular, que permitiria uma possível verticalização das composições. Outro ponto vivenciado no processo é a falta de um salvamento automatizado das imagens e informações pertinentes às dimensões dos cômodos. Da mesma forma, melhorias podem ser observadas para permitir que a escolha da composição seja conduzida de forma autônoma, possível assim, a comparação de modelos de processo de projeto como o *Performance-based formation models* e o *Performance based generation models*.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer à Universidade Federal de Santa Catarina, ao Laboratório GMA, e ao CAPES por meio da bolsa que proporcionou os recursos necessários para a construção dessa pesquisa.

REFERÊNCIAS

1. ALFARIS, Anas; MERELLO, Riccardo. The Generative Multi-Performance Design System. Acadia 08: Silicor + Skin > Biological Processes and Computation, n. 8, p.448-457, jan. 2008.

2. CALIXTO, Victor. GERAÇÃO AUTOMATIZADA DE LAYOUTS COM USO DE ALGORITMOS EVOLUTIVOS: Aplicação em Arquitetura e Urbanismo. 2016. 181 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Tecnologia e Cidade, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2016.

3. CAU SC (org.). Concurso N° 02/2021: premiação athis. Premiação ATHIS. 2021. Elaborado pela CAU - SC. Disponível em: https://www.causc.gov.br/editais/concurso-02-2021-premiacao-cathis/. Acesso em: 03 jan. 2022.

4. CELANI, Gabriela *et al*. A gramática da forma como metodologia de análise e síntese em arquitetura. Conexão – Comunicação e Cultura, Ucs, Caxias do Sul, v. 5, n. 10, p. 182-196, 10 jun. 2006.

5. COOREY, Benjamin P.; JUPP, Julie R. Generative spatial performance design system. Artificial Intelligence For Engineering Design, Analysis And Manufacturing, [s.l.], v. 28, n. 3, p.277-283, 22 jul. 2014. Cambridge University Press (CUP). http://dx.doi.org/10.1017/s0890060414000225.

6. CONSTANTINOU, Eliane; MACHADO, Letícia Bettio. HABITAÇÃO DE INTERESSE SOCIAL BRASILEIRA: uma análise sobre padrões tipo-morfológicos e políticas públicas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ARQUITETOS, 21., 2019, Porto

Alegre. Anais 21 Congresso Brasileiro de Arquitetos. Porto Alegre: [S.I], 2019. p. 1-28.

7. FATTINNANZI, Enrico; MICELLI, Ezio. Evaluating the architecture project. Valori e Valutazioni, Roma, v. [], n. 23, p. 3-13, jul. 2019.
8. FGV IBRE (Brasil). Instituto Brasileiro de Economia da Fundação Getúlio Vargas (org.). INCC: índice nacional de custo da construção. Índice Nacional de Custo da Construção. 2020. Disponível em: https://portal.fgv.br/fgv-ibre. Acesso em: 15 dez. 2020.
9. GONÇALVES, Cilene Marques; CEOTTO, Luiz Henrique. Custo sem susto: um método para gestão do custo de edificações. São Paulo: O Nome da Rosa, 2014. 160 p.
10. IES. Approved Method: IES Spatial Daylight Autonomy (sDA) and Annual Sunlight Exposure (ASE)-IES LM-83-12. Illuminating Engineering Society of North America. Nova Iorque. 2012.12p.
11. KNILL, Oliver. Probability Theory and Stochastic Processes with Applications: probability and stochastic processes with applications. 2009. ed. New Delhi: Overseas Press, 2009.
12. KOTNIK, Toni. Digital Architectural Design as Exploration of Computable Functions. International Journal of Architectural Computing, [S.I], v. 8, n. 1, p. 1-16, jan. 2010.
13. KOVACS, Adam Tamas; SZOBOSZLAI, Mihaly; CSUSZ, Istvan. Key for Entering Industry 4.0 in the AEC Sector: BIM Organisation Development. Ecaade 37 / Sigradi 23: BUILDING INFORMATION MODELLING, v. 1, n. 1, p.275-282, set. 2019.
14. LIMA, Flávia *et al*. Custo Unitário Geométrico: uma proposta de método de estimativa de custos na fase preliminar do projeto de edificações. SBQP 2013: III Simpósio Brasileiro de Qualidade do Projeto no Ambiente Construído, Campinas, p. 1-12, jul. 2013.
15. LIMA, F.S.A. Custo Unitário Geométrico: Uma Proposta de Método de Estimativa de Custos na Fase Preliminar do Projeto de Edificações. 2013. 116 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.
16. LIMA, Flavia. de *et al*. Orçamento Na Fase Da Viabilidade: comparativo dos parâmetros custo unitário básico e custo unitário geométrico. Entac 2016: XVI Encontro Nacional De Tecnologia Do Ambiente Construído, São Paulo, p. 3924-3937, out. 2016.
17. LOUKISSAS, Yanni Alexander. Co-Designers: Cultures of Computer Simulation in Architecture. New York: Routledge, 2012. 204 p.
18. MASCARÓ, Juan Luis. O Custo das Decisões Arquitetônicas. São Paulo: Nobel, 1985. 100 p.
19. MARIANO, Pedro Oscar Pizzetti *et al*. Automated Generation of Layouts and Budgets: Development and Application from Written Programming and Parametric Modeling. In: SIGRADI, 25., 2021, On Line. Proceedings of Sigradi 2021. On Line: Sigradi, 2021. p. 759-770. MCNEEL, R.; Associates. Rhinoceros 3D modeling Software. v. 5. 2014.
20. MORAES, Aline Fróes de Souza; PICCHI, Flavio; GRANJA, Ariovaldo. Variáveis E Índices Geométricos De Projeto Arquitetônico Relacionados Ao Custo De Empreendimentos Residenciais. In: ENTAC - ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 15., 2016, São Paulo. Anais. São Paulo: 2016. p. 3722-3732.
21. PEREIRA, Fernando O. *et al*. FERRAMENTA SIMPLIFICADA PARA A ESTIMATIVA DO DESEMPENHO DA ILUMINAÇÃO NATURAL EM EDIFICAÇÕES RESIDENCIAIS. In: ENTAC 2020, 18., 2020, Porto Alegre. Anais ENTAC 2020. Porto Alegre: Entac, 2020. p. 1-8
22. PROGRAMA CASA VERDE E AMARELA. Minha Casa Minha Vida: habitação urbana. Habitação Urbana. 2021. Caixa. Disponível em: https://www.caixa.gov.br/voce/habitacao/minha-casa-minha-vida/urbana/Paginas/default.aspx. Acesso em: 1 jul. 2021.
23. ROSSI, Andrea. Plugin para o Grasshopper, DDu Digital Design Unit, 2017, https://github.com/ar0551/Wasp
24. RUBIN, Graziela Rossatto; BOLFE, Sandra Ana. O desenvolvimento da habitação social no Brasil. Ciência e Natura, Santa Maria, v. 36, n. 2, p. 201-213, out. 2014.
25. RUTTEN, David; MCNEEL, Robert & Associates, 2014. Grasshopper 3D, EULA. www.grasshopper3d.com.
26. SADEGHIPOUR Roudsari, Mostapha. SUBRAMANIAM, Sarith. 2016. Automating Radiance workflows with Python. The 15th Annual Radiance Workshop. Padua, Italy. Available at: https://www.radiance-online.org/community/workshops/2016-padua/presentations/213-SadeghipourSubramaniam-AutomatingWorkflows.pdf .
27. SECRETARIA NACIONAL DE HABITAÇÃO. PROJETO BRA/00/019 - PNUD HBB: Como delimitar e regulamentar Zonas Especiais de Interesse Social ZEIS de Vazios Urbanos. Brasília, 2009. 50 p.
28. SENADO FEDERAL. LEI NO 10.257, DE 10 DE JULHO DE 2001: Estatuto da Cidade. Brasília: Subsecretaria de Edições Técnicas, 2001. 101 p.
29. SOLEMMA ClimateStudio. Version 1.4.79. Cambridge. 2021 https://www.solemma.com/climatestudio
30. TOMASETTI, Thornton. TT toolbox for Grasshopper, 2017 CORE studio. http://core.thorntontomasetti.com/colibri-release/
31. TERZIDIS, Kostas. The intricacy of the otherness. In: TERZIDIS, Kostas. Algorithmic Architecture. Nova Iorque: Architectural Press, 2006. Cap. 2. p. 1-14.7
32. VASQUEZ, Natalia Giraldo *et al*. DL Abacus- A Simplified Simulation-Based Tool for Daylighting Performance Assessment in Brazilian Dwellings. In: BUILDING SIMULATION 2021, 21., 2021, Bruges. Proceedings Building Simulation 2021. Bruges: [S.I], 2021. p. 1-8.