



UFOP  
Universidade Federal  
de Ouro Preto

UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO

Escola de Minas

Departamento de Arquitetura e Urbanismo



ESCOLA DE MINAS

Sissa Oliveira Guimarães

**SISTEMAS GENERATIVOS APLICADOS AOS PROCESSOS DE PROJETO DE  
HABITAÇÕES DE INTERESSE SOCIAL VISANDO A CUSTOMIZAÇÃO EM  
MASSA**

OURO PRETO – MG

2021

Sissa Oliveira Guimarães

**SISTEMAS GENERATIVOS APLICADOS AOS PROCESSOS DE PROJETO DE  
HABITAÇÕES DE INTERESSE SOCIAL VISANDO A CUSTOMIZAÇÃO EM  
MASSA**

Trabalho Final de Graduação apresentado ao  
Curso de Arquitetura e Urbanismo da  
Universidade Federal de Ouro Preto, como  
requisito parcial para a obtenção do grau de  
Bacharela em Arquitetura e Urbanismo.

Orientadora: Cláudia Maria Arcipreste  
Coorientadora: Lanna Larissa Rodrigues Rêgo  
de Oliveira

OURO PRETO – MG

2021

## SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

G963s Guimarães, Sissa Oliveira .  
Sistemas generativos aplicados aos processos de projeto de habitação de interesse social visando a customização em massa. [manuscrito] / Sissa Oliveira Guimarães. - 2021.  
62 f.: il.: color..

Orientadora: Profa. Dra. Cláudia Maria Arcipreste.  
Coorientadora: Dra. Lanna Larissa Rodridues Rêgo de Oliveira.  
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Arquitetura e Urbanismo .

1. Sistemas Generativos (SG's). 2. Produção (Teoria econômica) - Customização em Massa. 3. Habitação popular - Finanças. I. Arcipreste, Cláudia Maria. II. Oliveira, Lanna Larissa Rodridues Rêgo de. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 72:711.4

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB-1716



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
Universidade Federal de Ouro Preto  
Escola de Minas

Departamento de Arquitetura e Urbanismo



### ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Em 20 de abril de 2021 reuniu-se a banca examinadora do trabalho da aluna **Sissa Oliveira Guimarães**, apresentado como Trabalho de Conclusão do Curso Arquitetura e Urbanismo da Escola de Minas da UFOP, intitulado: SISTEMAS GENERATIVOS APLICADOS AOS PROCESSOS DE PROJETO DE HABITAÇÕES DE INTERESSE SOCIAL VISANDO A CUSTOMIZAÇÃO EM MASSA. Compuseram a banca os professores **Cláudia Maria Arcipreste** (Orientadora), **Lanna Larissa Rego de Oliveira** (Coorientadora), **Guilherme Ferreira Arruda** (Avaliador 1) e o arquiteto **Marcus Vinícius Bernardo** (Avaliador 2). Após a exposição oral a candidata foi arguida e os componentes da banca, reunindo-se reservadamente, decidiram pela APROVAÇÃO do trabalho, com a nota 9.5 (nove e meio).

Cláudia Maria Arcipreste (Orientadora)

Lanna Larissa Rego de Oliveira (Coorientadora)

Guilherme Ferreira Arruda (Avaliador 1)

Marcus Vinícius Bernardo (Avaliador 2)

## RESUMO

No contexto habitacional brasileiro a produção de moradias em larga escala é uma das estratégias que visam suprir o déficit habitacional no país. Diante disso, o presente trabalho apresenta resultados de uma pesquisa bibliográfica cujo objetivo foi analisar a aplicabilidade de *sistemas generativos* no processo de produção de habitação de interesse social visando a customização em massa. Pesquisas têm demonstrado que os projetos de grandes empreendimentos no contexto da habitação de interesse social não têm atendido às reais necessidades dos usuários. Observa-se a reprodução de tipologias arquitetônicas padronizadas que pouco ou nada se relacionam com os grupos e com os locais aos quais se destinam. Esse problema é especialmente evidente na produção habitacional por gestão pública, o que leva a uma incompatibilidade entre as residências e a real necessidade dos moradores ao longo da vida útil das mesmas, acarretando a necessidade de reformas para adaptações e ampliações. Diante da grande demanda por habitações, a implementação de tecnologias construtivas com maior nível de industrialização seria uma opção para sanar as carências existentes. O conceito de customização em massa está ligado à industrialização e essa estratégia pode ser aplicada no contexto da habitação social para possibilitar às empresas proporcionarem aos clientes uma gama de soluções projetuais com base em necessidades específicas, com custos e tempo de entrega similares ao alcançado na produção em massa. Nesse contexto os *sistemas generativos* surgem como uma ferramenta para automatizar uma parte do processo de projeto e tem potencial para otimizar a geração de possibilidades projetivas.

**Palavras-chaves:** *Sistemas Generativos*; Customização em Massa; Habitação de Interesse Social.

## **ABSTRACT**

In the Brazilian housing context, large-scale housing production is one of the strategies that aim to fill the housing deficit in the country. In face of this, the present work presents results of a bibliographic research whose objective was to analyze the applicability of generative systems in the production process of social housing aiming mass customization. Researches have shown that the projects of large enterprises in the context of social housing have not met the real needs of users. There is a reproduction of standardized architectural typologies that have little or nothing to do with the groups and the places to which they are intended. This problem is especially evident in housing production by public management, which leads to an incompatibility between the residences and the real need of the residents throughout their useful life, leading to the need for reforms for adaptations and extensions. In view of the great demand for housing, the implementation of construction technologies with a higher level of industrialization would be an option to remedy the existing deficiencies. The concept of mass customization is linked to industrialization and this strategy can be applied in the context of social housing to enable companies to provide customers a range of design solutions based on specific needs, with costs and delivery time similar to that achieved in the mass production. In this context, generative systems appear as a tool to automate part of the design process and have the potential to optimize the generation of design possibilities.

**Keywords:** Generative Systems; Mass Customization; Social Housing.

## **AGRADECIMENTOS**

Para a concretização deste trabalho, contei com as orientações cuidadosas das professoras Cláudia Maria Arcipreste e Lanna Rêgo.

Agradeço à Lanna pelo empenho dedicado ao meu projeto de pesquisa, pelo esforço em aprender sobre uma nova área da arquitetura junto comigo e pela presença constante e atenta nas orientações. À Cláudia pelas contribuições, pelo olhar crítico, pelo incentivo e confiança no meu trabalho.

Aos meus pais pelo incentivo de sempre aos estudos. Agradeço a minha mãe por todo carinho, por me ajudar a manter o foco e acreditar no meu potencial mesmo quando eu duvidei. Ao meu pai, e tio Gil por todo apoio e encorajamento. Essa conquista também é de vocês.

À tia Jaque pelas orientações e dicas tão importantes. Obrigada por me mostrar caminhos para encarar o processo da escrita de forma mais leve. Você é uma grande referência para mim.

Agradeço também aos meus amigos, obrigada pela torcida e pelas energias positivas.

A todos que em algum momento ou de alguma forma me auxiliaram nesta trajetória, muito obrigada!

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> – Comparação entre plantas de diferentes empreendimentos do PMCMV .....	20
<b>Figura 2</b> – Adaptações relacionadas aos espaços subdimensionados.....	21
<b>Figura 3</b> - Plantas de empreendimentos do PMCMV – Entidades (apartamentos).....	23
<b>Figura 4</b> - Plantas de empreendimentos do PMCMV – Entidades (casas).....	23
<b>Figura 5</b> – Comparação entre produção em massa, customização e customização em massa	26
<b>Figura 6</b> – Estrutura de funcionamento de um sistema generativo .....	30
<b>Figura 7</b> – Modelos gerados a partir da variação dos dados de entrada em um <i>modelo paramétrico</i> .....	32
<b>Figura 8</b> – Estrutura básica dos <i>algoritmos evolutivos</i> .....	34
<b>Figura 9</b> – Diferentes indivíduos obtidos a partir da variação dos parâmetros .....	35
<b>Figura 10</b> – Exemplo de codificação de um indivíduo.....	38
<b>Figura 11</b> – As três formas de mutação em um algoritmo genético.....	38
<b>Figura 12</b> – Tipos de recombinação .....	39
<b>Figura 13</b> – Mapeamento do processo de projeto com algoritmo evolutivo .....	40
<b>Figura 14</b> – Programação utilizando linhas de código e componentes visuais .....	40
<b>Figura 15</b> – Processo de criação das peças do sistema construtivo.....	43
<b>Figura 16</b> - Variações de projeto geradas com o algoritmo desenvolvido .....	44
<b>Figura 17</b> – Diagrama do <i>Housing Agent System</i> .....	47
<b>Figura 18</b> – Modelo gerado em <i>Grasshopper</i> mostrando parâmetros que possibilitam mudanças incrementais.....	48
<b>Figura 19</b> – Função de casa algoritmo em cada etapa.....	49
<b>Figura 20</b> – Sucessivas fases de expansão das unidades habitacionais .....	50
<b>Figura 21</b> – Representação esquemática do algoritmo grau de intimidade .....	52
<b>Figura 22</b> – atributos do modelo BIM. ....	53
<b>Figura 23</b> – Compatibilização entre plantas e sistema construtivo .....	54
<b>Figura 24</b> – Exemplo de documentação do projeto .....	55

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIACÕES

**BIM** – Modelo de Informação da Construção (*Building Information Model*)

**BH** – Belo Horizonte

**BNH** – Banco Nacional de Habitação

**CAIXA** – Caixa Econômica Federal

**CM** – Customização em Massa

**EAUFMG** – Escola de Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal de Minas Gerais

**EP** – Programação Evolutiva (*Evolutionary Programming*)

**ES** – Estratégia Evolutiva (*Evolution Strategy*)

**GA** – Algoritmo evolutivo (*Genetic Algorithm*)

**HAS** – *Housing Agency System*

**HIS** – Habitação de Interesse Social

**PMCMV** – Programa Minha Casa Minha Vida

**PMCMV – Entidades** – Programa Minha Casa Minha Vida – Entidades

**UNMP** – União Nacional por Moradia Popular

**UH** – Unidade Habitacional

**VLP** – Linguagem de Programação Visual (*Visual Programming Language*)

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>11</b>
<b>1.1 Justificativa .....</b>	<b>13</b>
<b>1.2 Objetivos.....</b>	<b>15</b>
<i>1.2.1 Objetivo Geral .....</i>	<i>15</i>
<i>1.2.2 Objetivos Específicos.....</i>	<i>15</i>
<b>1.3 Metodologia.....</b>	<b>15</b>
<b>2 A PRODUÇÃO CONTEMPORÂNEA DE HABITAÇÃO SOCIAL NO BRASIL ..</b>	<b>17</b>
<b>2.1 Contextualização do cenário da produção de habitação social brasileira.....</b>	<b>17</b>
<b>2.2 A produção habitacional em larga escala via PMCMV .....</b>	<b>19</b>
<b>2.3 Customização em massa no contexto da habitação .....</b>	<b>25</b>
<b>3 SISTEMAS GENERATIVOS DE PROJETO .....</b>	<b>29</b>
<b>3.1 Parametrização .....</b>	<b>31</b>
<b>3.2 Algoritmos evolutivos.....</b>	<b>32</b>
<i>3.2.1 Inspiração Na Natureza: A Teoria Da Evolução Das Espécies.....</i>	<i>34</i>
<b>4 PROCESSOS DE PROJETO COM O USO DE ALGORITMOS .....</b>	<b>37</b>
<b>4.1 Os componentes e o processo .....</b>	<b>37</b>
<b>4.2 As ferramentas .....</b>	<b>40</b>
<b>5 PANORAMA DA PRODUÇÃO: EXEMPLOS DE CASOS.....</b>	<b>42</b>
<b>5.1 Fabricação digital .....</b>	<b>42</b>
<i>5.1.1 Customizing Mass Housing in Brazil: Introduction to na Integrated System .....</i>	<i>42</i>
<i>5.1.2. Edificação Modular: Estudo de caso e protótipo de um sistema construtivo de código aberto utilizando prototipagem rápida.....</i>	<i>45</i>
<b>5.2 Definição de arranjos espaciais com o auxílio de algoritmos .....</b>	<b>46</b>
<i>5.2.1 Housing Agency System (HAS): multi-criteria satisficing &amp; mass-customization of homes.....</i>	<i>46</i>
<i>5.2.2 Projeto de Habitações de Interesse Social segundo uma abordagem generativa .....</i>	<i>49</i>
<b>5.3 Definição de arranjos espaciais com o auxílio de algoritmos associados à gramática da forma.....</b>	<b>51</b>

<i>5.3.1 Identification of applicable patterns to algorithmization in BIM to explore solutions in the design stage of Social Housing</i> .....	51
<i>5.3.2 Digital Morphogenesis: A Computational Housing Typology</i> .....	53
<b>6 CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	<b>56</b>
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>59</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Pesquisas têm demonstrado que os projetos de grandes empreendimentos no contexto da habitação de interesse social (HIS) não têm atendido às reais necessidades dos usuários. Observa-se a reprodução de tipologias arquitetônicas padronizadas que pouco ou nada se relacionam com os grupos e com os locais aos quais se destinam. Esse problema é especialmente evidente na produção habitacional por gestão pública (TEIXEIRA, 2004), o que leva a uma incompatibilidade entre a residência e a real necessidade dos moradores “acarretando em inúmeras adaptações e ampliações, que implicam dispêndio de recursos financeiros [...] e prejuízos à qualidade da habitação” (TAUBE e HIROTA, 2017, p.1).

A partir da segunda metade do século XX os consumidores vêm demonstrando uma necessidade crescente por serviços e bens mais personalizados. Nesse mesmo período, os avanços tecnológicos permitiram aperfeiçoamentos na indústria e nos meios de produção, proporcionando a criação de métodos com o objetivo de garantir essa personalização (CELANI et al., 2013).

Diante da grande demanda por habitações os sistemas construtivos industrializados se apresentam como uma boa opção para garantir alta produtividade e sanar as carências relacionadas à padronização das residências. “Um desses métodos de produção é conhecido como customização em massa (CM), que é um processo de fabricação de bens que permite o alto nível de customização do produto em escala industrial” (BRASIL e FRANCO, 2019, p.605).

Neste trabalho busca-se identificar os principais problemas das HIS ligados à produção em massa e falta de participação do usuário. Essa análise é realizada com o intuito de compreender os aspectos e requisitos não atendidos por esse tipo de moradia. As estratégias que envolvem a customização em massa são investigadas como um caminho para solucionar essas questões juntamente com o uso de *sistemas generativos* de projeto, que consideramos ter potencial para trabalhar esses caminhos de melhorias da produção em escala industrial.

Podemos perceber que a revolução computacional afetou diversos campos da indústria, permitindo que altos níveis de personalização de produtos e serviços sejam alcançados (BRASIL e FRANCO, 2019) e no campo construção civil não tem sido diferente. A transformação digital está cada vez mais presente no *design*, na arquitetura e no urbanismo. É possível perceber cada vez mais a adoção de ferramentas digitais por arquitetos, e ao longo das

décadas é notável o impacto da adoção do desenho auxiliado por computador no que diz respeito à representação ou desenvolvimento de projetos arquitetônicos.

Segundo Shea *et al* (2005) a *modelagem paramétrica* muda o papel do computador no processo de projeto, que passa de assistente de modelagem para o que seria equivalente a um agente de processo, assim o computador passa de uma ferramenta passiva para um suporte ativo, e nesse processo de mudança “os *sistemas generativos* baseados em plataformas digitais podem ser vistos como a materialização final desta transformação” (SANCHES *et al.* 2018, p. 133).

A *parametrização* “refere-se à relação entre todos os elementos em um projeto que permite a coordenação entre as partes e o gerenciamento de alterações” (AUTODESK, 2019), por isso, quando se altera um elemento todos os outros ligados a ele irão responder a essa mudança. No caso da *modelagem paramétrica*, todos os ajustes são feitos de forma manual.

Com o algoritmo evolutivo o arquiteto abre mão do controle total em prol da automação de uma parte do processo de projeto. Os *algoritmos* acessam os parâmetros, e por meio de *scripts* (conjunto de instruções para que uma função seja executada) geram inúmeras soluções com base em critérios pré-estabelecidos. Nessa metodologia os arquitetos deixam de controlar definições específicas das soluções formais para operarem mais especificamente na definição dos problemas.

Este trabalho apresenta resultados de uma pesquisa bibliográfica cujo objetivo foi analisar a aplicabilidade de *sistemas generativos* no processo de produção de HIS visando a customização em massa, a fim de melhor atender às demandas dos usuários. O debate teórico foi pautado em trabalhos de autores que discutem a eficácia da produção de HIS pelo poder público e tem como pano de fundo empreendimentos do Programa Minha Casa Minha Vida<sup>1</sup> (PMCMV).

No capítulo 2 é feita uma contextualização e análise da produção de habitação de interesse social no Brasil com foco na produção do PMCMV. Nesse capítulo é abordado também o tema customização em massa na habitação, relacionando com o conceito de flexibilidade e industrialização na construção civil. No capítulo 3, é realizada uma sistematização da revisão de literatura, buscando uma síntese conceitual sobre, *sistemas generativos* de projeto, *algoritmos evolutivos* e *parametrização*.

---

<sup>1</sup> Em agosto de 2020 foi lançado pelo governo federal uma nova política habitacional do governo para substituir o Programa Minha Casa Minha Vida: o Programa Minha Casa Verde Amarela. O novo programa conta com algumas atualizações em relação ao seu antecessor e foi aprovado em 15 de janeiro de 2021 com a assinatura do decreto que o regulamenta.

No capítulo 4 apresenta-se um aprofundamento teórico voltado para os processos de projeto que utilizam *sistemas generativos* e *algoritmos evolutivos*. No capítulo 5, serão apresentados exemplos da aplicação dos *sistemas generativos* (mais especificamente modelagem paramétrica e algoritmos evolutivos) voltados para a automação da geração de projetos arquitetônicos e sistemas construtivos relacionados à customização em massa.

É importante salientar que esse trabalho não irá explorar de forma aprofundada as raízes do *déficit* habitacional no Brasil, questões legais relacionadas à adesão e normas de uso de um imóvel do PMCMV, questões institucionais relacionadas a parceria público privada, questões orçamentárias, discussões acerca do mercado imobiliário e formas de produção de HIS como a autoconstrução ou assessorias técnicas. A proposta é investigar o potencial de um processo de projeto alternativo com o uso dos *sistemas generativos* para solucionar problemas que envolvem a configuração espacial das moradias sociais produzidas pela parceria do poder público com construtoras ou incorporadoras.

### **1.1 Justificativa**

A adoção de projetos-padrão para empreendimentos habitacionais de interesse social segundo a lógica da produção em massa, tem resultado na insatisfação dos usuários. Esses tipos de empreendimentos apresentam espaços prontos, padronizados, difíceis de serem adaptados, e não contemplam atributos espaciais como mutabilidade, conectividade e eficiência. Por isso as Unidades Habitacionais (UHs) não atendem à diversidade de necessidades dos usuários (LAMOUNIER, 2017; BRANDÃO 2011). Diante disso, é importante que sejam investigadas alternativas para atender melhor às necessidades dessa população.

Para Palhares (2001) o interesse econômico é um dos fatores que faz com que o adensamento máximo e a repetição de tipologias mínimas sejam privilegiados em prol da qualidade da moradia, e a falta de qualidade é o fator que gera a necessidade de modificações nas residências pelos usuários. Além disso, Lamounier (2017) aponta que a precariedade do processo produtivo e dos sistemas construtivos, a utilização predominante de alvenaria estrutural, além do programa de necessidades restrito, são os principais fatores que dificultam expansões, aberturas e a mutabilidade das habitações, o que indica que existem deficiências nesses programas que deveriam ser superadas.

Os arquitetos têm a capacidade de melhorar a qualidade desses ambientes, entretanto, em grandes empreendimentos, eles não possuem autonomia quanto ao projeto das residências (BERGIN e STAINFELD, 2012). Sendo assim, por meio do desenvolvimento de projetos por

meio de *sistemas generativos* e CM o arquiteto poderia se envolver de maneira mais efetiva a partir da definição de condições e restrições que serão resolvidas algoritmicamente.

No contexto habitacional brasileiro a produção de moradias em larga escala é uma das estratégias que visam suprir o déficit habitacional no país (LAMOUNIER, 2017). A proposta deste estudo é trazer enfoque para a construção de moradias em massa e estudar formas de solucionar as deficiências identificadas nos modelos de habitação da forma que vem sendo pautados. Nesse sentido, “defende-se para a cadeia de evolução da construção civil brasileira a implementação de alternativas com um maior nível de industrialização, que alia a ideia de organização, qualidade e controle de processos” (MALTA, 2021, p.28).

A industrialização está associada com o uso de sistemas construtivos pré-fabricados (a exemplo das soluções em estruturas leves como aço e madeira) que visam aumentar os níveis de produção e produtividade além produzir tipologias habitacionais a preços acessíveis em larga escala (MALTA, 2021) e reduzir desperdício de material. Utilizar componentes e sistemas industrializados não significa produzir habitação padronizada.

O conceito de customização em massa também está associado à ideia de industrialização e pode ser aplicado à produção de moradias em larga escala. Essa é uma estratégia que possibilita às empresas proporcionarem aos clientes uma gama de opções de produtos com base em necessidades específicas, com custos e tempo de entrega similares ao alcançado na produção em massa. A literatura aponta estudos que têm recorrido à CM para atender o mercado da habitação, no qual os usuários possuem uma grande diversidade de necessidades (TAUBE e HIROTA, 2017).

Dentro do processo de customização em massa existe a fase de geração das alternativas e avaliação das alternativas. Nessas etapas identifica-se a possibilidade de implementar os *sistemas generativos* de projeto a fim de possibilitar uma automação de etapas repetitivas.

Experimentos de customização em massa para produção de arquitetura, através de uma abordagem paramétrica e algorítmica, já foram estudados anteriormente e apresentam, parcialmente ou na sua totalidade, resultados como o dimensionamento multicritério da habitação (implantação, variabilidade volumétrica e conforto ambiental); modelos paramétricos flexíveis, como ferramentas de otimização e busca de melhores soluções; interfaces para interação cliente-*designer*, o que melhora as opções de escolha, bem como a otimização de custos; avaliação do ciclo de vida e monitoramento e controle da construção. (GAZERL, *et al.* 2018)

Em um contexto no qual estamos tratando de uma produção em massa essa automatização poderia trazer vantagens como: 1) otimização do fator tempo, 2) otimização do fator custo, 3) possibilidade de explorar um número muito maior de possibilidades projetivas do que seria

possível sem o auxílio dessa ferramenta, 4) possibilidade de encontrar opções inovadoras e de alto desempenho adequadas ao objetivo do projeto.

## **1.2 Objetivos**

### *1.2.1 Objetivo Geral*

Analisar a aplicabilidade de *sistemas generativos* no processo de projeto no contexto da produção de habitação de interesse social em larga escala visando a customização em massa para melhor atender às demandas dos usuários.

### *1.2.2 Objetivos Específicos*

Foram definidos como objetivos específicos deste trabalho:

- a) Revisar o conteúdo teórico e prático da arquitetura relacionado à produção de moradia social em massa a fim de identificar as principais características e requisitos não atendidos;
- b) Revisar o conteúdo teórico e prático da arquitetura relacionado à customização em massa;
- c) Revisar o conteúdo teórico e prático da arquitetura relacionado à prática projetual na qual se utiliza *sistemas generativos* para automatizar uma parte do processo de projeto;
- d) Identificar barreiras e oportunidades para o uso de *sistemas generativos* com sua aplicação voltada para a customização em massa.

## **1.3 Metodologia**

O presente trabalho é de natureza qualitativa, de caráter exploratório, baseado em revisão de literatura. No primeiro momento, para obter os dados que possibilitem verificar as principais características e requisitos não atendidos pela produção de moradia social nos moldes em que ela vem sendo pautada, buscou-se identificar os principais problemas das HIS ligados à produção de moradia em massa e falta de participação do usuário nos processos. Para isso foi realizada uma pesquisa bibliográfica contextualizando a produção de HIS no Brasil tendo como

plano de fundo a análise de empreendimentos de iniciativa do poder público viabilizados pelo PMCMV.

No segundo momento tratou-se da customização em massa na habitação sob o ponto de vista da flexibilização dos projetos. Essa estratégia foi explorada como um caminho para solucionar os problemas identificados na produção de moradia social em larga escala pautada na ideia de industrialização na construção civil e associada com o uso de *sistemas generativos* de projeto.

No terceiro momento partimos para uma sistematização da revisão de literatura, buscando uma síntese conceitual sobre, *sistemas generativos* de projeto, *algoritmos evolutivos* e *parametrização*. Apresenta-se um aprofundamento teórico voltado para os processos de projeto que utilizam *algoritmos evolutivos* para posteriormente apresentar e analisar exemplos de experimentos embasados nos conceitos estudados e que contribuam para a discussão acerca da implementação de *algoritmos evolutivos* no processo de projeto a fim de viabilizar a customização em massa.

Por fim, a compilação desses dados resulta na identificação de barreiras e oportunidades para o uso dos *sistemas generativos* com sua aplicação voltada para a customização em massa na produção de HIS.

## **2 A PRODUÇÃO CONTEMPORÂNEA DE HABITAÇÃO SOCIAL NO BRASIL**

No presente capítulo busca-se caracterizar o campo da habitação de interesse social brasileira, ou seja, a produção de habitação destinada a famílias de baixa renda que não têm acesso ao mercado imobiliário e moradia digna. O debate teórico foi pautado em trabalhos de autores que discutem a eficácia da produção de HIS pelo poder público e tem como pano de fundo empreendimentos do PMCMV.

O PMCV viabilizou empreendimentos em todo o Brasil e tem como característica a implementação de grandes conjuntos habitacionais a partir da reprodução de UHs padronizadas e sem participação dos usuários nos processos, por isso se enquadra no tema dessa pesquisa.

No tópico 2.1 será feita uma breve contextualização do cenário da produção de moradia social no Brasil, a partir do século XX, no tópico 2.2 será analisado o cenário da produção de HIS pelo PMCMV. E no tópico 2.3 iremos aprofundar no tema da customização em massa na habitação, abordando o conceito de flexibilidade e a importância da industrialização na construção civil.

### **2.1 Contextualização do cenário da produção de habitação social brasileira**

A produção de moradia social nas cidades é um tema complexo cuja necessidade está atrelada a diversos fatores de cunho econômico, político e social. O aumento crescente da urbanização afeta a lógica de funcionamento das cidades e compromete a qualidade de vida da população – em especial a de baixa renda – visto que gera uma sobrecarga na necessidade de infraestrutura e equipamento devido ao crescimento da população que vive nas cidades, influenciando também no *déficit* habitacional e na inadequação das condições de moradia da população pobre (RUBIN e BOLFE, 2014).

Até o final o século XIX, o índice de urbanização brasileiro não teve alteração considerável, somente no período entre 1920 e 1940 que o Brasil viu sua taxa de urbanização crescer de forma expressiva. (SANTOS, 2019 *apud* RUBIN e BOLFE, 2014). Em meados de 1930, na Era Vargas, teve início as intervenções do governo no setor habitacional incluindo a construção de conjuntos residências para a população de baixa renda, que eram em sua maioria, os trabalhadores das indústrias e suas famílias.

[...] o objetivo dos governos desenvolvimentistas era estimular a criação de uma solução habitacional de baixo custo na periferia, visto ser ela conveniente para o modelo de capitalismo que se implantou no país a partir de 1930, por manter baixos os custos de reprodução da força de trabalho e viabilizar o investimento na

industrialização do país (BONDUKI, 2004, p. 12 *apud* RUBIN e BOLFE, 2014, p. 204).

Dessa forma, segundo Rubin e Bolfe (2014), o fato da população de baixa renda ser comumente inserida nas periferias das cidades é uma condição histórica que não está ligada às reais necessidades dessas pessoas.

Já na década de 1960, em um contexto político e econômico de regime militar instaurado pelo golpe de 1964, foi criado o Banco Nacional de Habitação (BNH) e o Sistema Financeiro de Habitação (SFH) - órgão gerenciador de financiamentos do BNH. O BNH, com o objetivo de reduzir o *déficit* habitacional, financiou moradias em todo o país entre 1964 a 1986. Constantinou e Machado (2019) destacam a importância desse momento atrelado ao contexto das moradias sociais, visto que a anulação do regime democrático gerou transformações significativas na organização das nossas cidades.

Após a retomada do regime democrático houveram outras iniciativas governamentais com o intuito de solucionar os problemas de habitação. Com a extinção do BNH e a promulgação da Constituição de 1988, surge uma nova fase da política habitacional brasileira denominada “Pós-BNH”. Nessa nova fase, que se estende de 1986 a 1999, o órgão responsável por financiar a produção de moradias sociais passou a ser a Caixa Econômica Federal (CAIXA), e o foco da produção da HIS eram experiências alternativas as que eram praticadas anteriormente como concursos públicos e parcerias do poder público com empresas privadas (CONSTANTINOU e MACHADO, 2019).

Nessa fase ocorre a descentralização da gestão e produção da habitação social, dividindo a responsabilidade da moradia às três instâncias governamentais: municipal, estadual e federal” (BONDUKI, 2014 *apud* CONSTANTINOU e MACHADO, 2019). A partir de 2003, no governo do presidente Luís Inácio Lula da Silva, com a criação do Ministério das Cidades (órgão responsável pela Política Nacional de Habitação) a política habitacional brasileira passou por um novo arranjo (RUBIN e BOLFE, 2014).

As necessidades de investimento no campo habitacional se intensificam a partir de 2004 e duram até a crise econômica de 2008, e a resposta do governo para tentar contornar os efeitos na crise foi a implantação PMCMV (CONSTANTINOU e MACHADO, 2019) que ao mesmo tempo visava geração de emprego, renda e moradia. Essa iniciativa é caracterizada pela parceria público-privada e a produção de unidades habitacionais em massa visando o baixo custo a fim de ser mais acessível à população de baixa renda.

## 2.2 A produção habitacional em larga escala via PMCMV

A fim de verificar os aspectos não atendidos pela produção de moradia social em larga escala foi realizada uma pesquisa bibliográfica que teve como pano de fundo as ações do PMCMV. Acredita-se que por meio desse estudo seja possível compreender de forma mais precisa quais são as carências nas tipologias arquitetônicas e conjuntos habitacionais adotados atualmente, bem como identificar possibilidades de abertura à customização em massa que serão discutidas no tópico 2.3.

O PMCMV foi uma iniciativa do Governo Federal que oferecia condições facilitadas para o financiamento de moradias nas áreas urbanas. Quatro faixas de renda eram contempladas, sendo que no ano de 2020 a faixa 1 corresponde as famílias com menor poder aquisitivo (renda de até R\$ 1.800,00) e a faixa 4 atinge a renda de até R\$ 7.000,00. A produção do PMCMV para a Faixa 1 tem como características mais significativas a ampla padronização dos projetos e o grande porte dos empreendimentos. Por isso, essa será a modalidade tratada com mais enfoque nesse trabalho.

Em agosto de 2020 foi lançado pelo governo federal uma nova política habitacional do governo para substituir o PMCMV: o Programa Minha Casa Verde Amarela (PMCVA). Esse programa conta com algumas atualizações<sup>2</sup> em relação ao seu antecessor e foi aprovado em 15 de janeiro de 2021 com a assinatura do decreto que regulamenta o novo programa. A partir dessa data, todas as novas operações com benefício habitacional geridas pelo governo federal devem ser firmadas com base no modelo do PMCVA (GOVERNO BRASILEIRO, 2020). Neste trabalho será discutida a produção do antigo PMCMV, que teve atuação expressiva até o ano de 2020.

Existem uma série de estudos avaliativos sobre o programa que tratam de diferentes aspectos como: os agentes e operações do programa e demanda habitacional, a oferta do programa e a inserção urbana e a segregação socioespacial (NASCIMENTO *et al.*, 2015). O aspecto colocado como foco desta pesquisa consiste na análise das soluções de desenho, projeto e produção dos empreendimentos.

Quanto aos projetos arquitetônicos o PMCMV destinado a faixa 1 implementou majoritariamente tipologias rígidas e homogêneas de apartamentos de dois quartos com 39 a 44m<sup>2</sup>. Os apartamentos são organizados em sua maioria em edifícios de 4 ou 5 pavimentos em

---

<sup>2</sup> Entre as principais mudanças em relação ao PMCMV, a nova política habitacional não prevê mais a faixa de renda mais baixa (faixa 1), que contemplava famílias com renda até R\$ 1,8 mil reais e não tinha juros. O novo programa também prevê outras ações, como reforma para melhorias da moradia e regularização fundiária.

formato “H” ou “fita”, dispostos em condomínios privados nas franjas periféricas urbanas, desagregadas socioespacialmente das cidades (NASCIMENTO, *et al.*, 2015).

Essas tipologias são baseadas em uma composição familiar média e padrão instituídas pelo IBGE (pai, mãe e dois filhos) e em todas as tipologias prevalece a lógica da tripartição funcional modernista dos setores da casa – área social, de serviço e íntima. O sistema construtivo empregado é o autoportante, sendo que a parede-concreto moldada in loco é a preferência das construtoras em relação à parede de alvenaria em blocos de concreto estrutural (PRÁXIS-EAUFMG, 2014).

A pesquisa da Práxis-EAUFMG (2014) constatou que não há variação em relação ao tipo de empreendimento e unidades habitacionais que sejam capazes de promover algum grau de complexidade espacial em função da existente diversidade social do público alvo. Podemos notar através da comparação entre UHs de 6 empreendimentos diferentes do PMCMV na região metropolitana de BH mostrada na **Figura 1**. Além disso não há participação dos usuários nos processos. É possível perceber que a viabilidade econômica acaba sendo priorizada em detrimento da diversidade tipológica do empreendimento.

**Figura 1** – Comparação entre plantas de diferentes empreendimentos do PMCMV



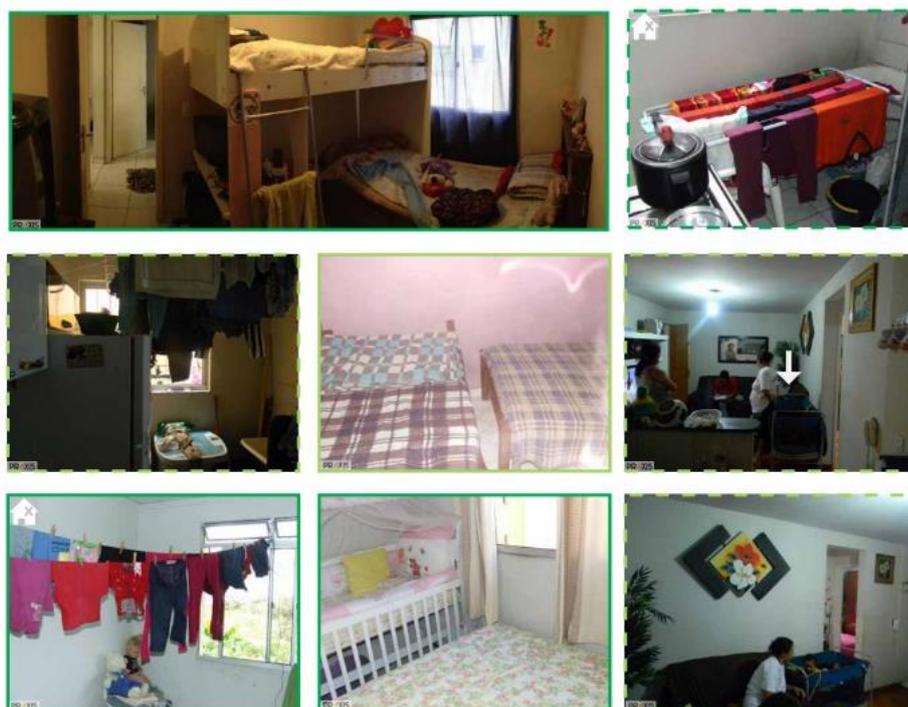
Fonte: Adaptado de Práxis, EA-UFMG, 2014

A CAIXA afirma que não há determinação de uma tipologia única, entretanto “a referência do mobiliário dada pelas especificações mínimas do programa, referendadas pela CAIXA, objetiva limitar minimamente a área da unidade” (NASCIMENTO *et al.*, 2015, p. 150). As construtoras se detêm ao mínimo requisitado por questões financeiras.

Paradoxalmente, a padronização de processos e de componentes atrela-se à padronização de soluções de projeto (que não é obrigatória), e se torna um impeditivo de flexibilização e variedade tipológica. A consequência disso é um padrão nacional de moradias que é implementado pelos municípios independentemente das características físicas dos terrenos, das condições bioclimática locais e das necessidades habitacionais dos moradores (NASCIMENTO *et al.*, 2015).

A pesquisa da Práxis-EAUFMG (2014) também aponta uma série de adaptações relacionadas aos espaços subdimensionados (**Figura 2**). Improvisos para viabilizar a secagem de roupas está entre as adequações mais evidente frente à insuficiência do tamanho da área de serviço projetada. “Os quartos não estão dimensionados suficientemente para abrigar duas camas de solteiro, seja em razão da circulação e dos móveis de apoio, seja pela posição da janela e do armário” (PRAXIS-EAUFMG, 2014, p.) por isso o é recorrente o uso de camas beliche para ganhar espaço ou abrigar mais pessoas na residência.

**Figura 2** – Adaptações relacionadas aos espaços subdimensionados



Fonte: Práxis-EAUFMG, 2014

Também é comum ter geladeira, máquina de lavar ou micro-ondas na sala, o que indica que o espaço para uso dos eletrodomésticos e circulação na cozinha e área de serviço é insuficiente. Essa sobreposição de usos se torna um problema ainda maior quando o morador exerce alguma atividade de trabalho em casa, tornando ainda mais difícil realizar as atividades do dia-a-dia de maneira adequada e confortável no espaço disponível. Além disso, as famílias que moram no andar térreo eventualmente se apropriam das áreas externas comuns (PRAXIS-EAUFMG, 2014).

Como a tipologia arquitetônica dos empreendimentos normalmente é única, ela não considera a ideia de que as famílias possuem demandas distintas e têm composições diferentes em número de pessoas, esse fator leva a sobreposição de funções que geram conflitos de uso, e também faz com que haja a necessidade de alteração de *layout* e criação de novos cômodos.

Com isso, podemos perceber que nem sempre as intervenções realizadas pelos moradores conseguem resolver os problemas, e muitas vezes acarretam em falhas que comprometem ainda mais a qualidade arquitetônica das casas. A mudança da configuração espacial interna gera em algumas situações cômodos com dimensões insuficientes, problemas de circulação, comprometimento de condições de conforto ambiental, comprometimento de área livre e sobreposição de funções conflituosas.

Há, dentro do programa modalidades de financiamento que supostamente apresentam processos e produtos habitacionais que seriam mais próximos às necessidades dos moradores. Uma modalidade que se diferencia sob alguns aspectos é o Programa Minha Casa Minha Vida – Entidades, criado para atender a faixa 1 que concede financiamento diretamente aos beneficiários (Pessoa Física) ou a Entidade Organizadora (Pessoa Jurídica).

O grande diferencial do PMCMV – Entidades é a participação dos futuros moradores no processo de desenvolvimento e execução do projeto. O programa prevê dois regimes de construção, sendo eles a autogestão, que compreende a autoconstrução, mutirão ou autoajuda e administração direta da execução da obra e a cogestão, que compreende a empreitada global e é obrigatória para as construções verticalizadas (CAIXA, 20-).

A implementação da autogestão representa um avanço na política habitacional do PMCMV, esse modelo admite uma aproximação entre o arquiteto e o usuário e dá direito a participação do morador nos processos que envolvem a construção da sua casa própria através das assembleias e mutirões para a construção também contribuindo também para fortalecendo os vínculos de vizinhança, liderança e pertencimento.

Entretanto, ao analisarmos as configurações espaciais resultantes dos projetos desenvolvidos no âmbito dessa modalidade (**Figura 3 e Figura 4**), o tamanho das residências ainda é contido às dimensões mínimas, os projetos não visam facilitar futuras expansões (mesmo no caso de residências unifamiliares) e na maioria dos empreendimentos residenciais a implementação ocorre a partir da reprodução de uma tipologia única com dois dormitórios (no caso de apartamentos é comum ter de 2 a 4 tipologias).

**Figura 3** - Plantas de empreendimentos do PMCMV – Entidades (apartamentos).



Fonte: Adaptado de UNMP, 2019

**Figura 4** - Plantas de empreendimentos do PMCMV – Entidades (casas).



Fonte: Adaptado de UNMP, 2019

Os empreendimentos do PMCMV – Entidades podem conter até 500 unidades habitacionais, então, por mais que haja uma participação dos usuários nos processos de desenvolvimento do projeto, ao escolher e replicar apenas uma tipologia desconsidera-se a diversidade de composição dos núcleos familiares.

A partir das informações apresentadas é possível constatar algumas questões significativas sobre as moradias frutos do PMCMV. As unidades habitacionais são padronizadas a fim de viabilizar a reprodução em série. O formato em “H” ou em “fita” dos edifícios, bem como sua implantação no terreno está associada à busca por maior adensamento. O emprego e replicação desse tipo arquitetônico em locais distintos desconsidera as condicionantes naturais locais como como insolação, ventilação e topografia.

O sistema construtivo adotado impede o uso de tipologias adaptáveis e/ou ampliáveis. Além disso a exclusão do morador dos processos decisórios, a padronização da configuração familiar e a replicação de uma tipologia genérica são problemas inerentes a produção habitacional realizada pelo programa.

No contexto da produção de HIS apresentado, a racionalização dos espaços determinada por interesses econômicos resulta numa redução excessiva das dimensões dos cômodos, o que compromete sua funcionalidade (PALHARES, 2001). “É, ao longo da ocupação das unidades, que percebemos se os espaços das habitações têm sido capazes de atender minimamente às necessidades dos moradores” (PALHARES, 2001, p. 14) e o fato de ser comum que eles sintam a necessidade de fazer diversas modificações nas residências indica a inadequação do tipo único e padrão da unidade habitacional ofertada.

Vimos que nesses empreendimentos não há participação dos usuários nos processos decisórios. Logsdon *et al.* (2019, p. 1551) afirmam que “para atender às necessidades de usuários que, a princípio, são desconhecidos, a literatura recomenda a atenção aos princípios norteadores, como a funcionalidade e a flexibilidade”. A funcionalidade é um dos princípios que confere qualidade ao projeto e está relacionada à criação do espaço e mobiliário que sejam capazes de atender de forma satisfatória às atividades desempenhadas na moradia.

Seus princípios partem da investigação e compreensão das necessidades humanas e como satisfazê-las a fim de viabilizar que essas atividades sejam realizadas em espaços apropriados e com os equipamentos necessários, e para isso, um projeto de habitação funcional deve ser baseado em três critérios básicos: o programa habitacional, as dimensões dos espaços da moradia, o mobiliário mínimo e sua área de uso (AMORIM *et al.*, 2015; PEREIRA, 2015).

Sendo assim, se considerarmos que a funcionalidade de uma residência está atrelada a: (1) um programa habitacional adequado às necessidades dos moradores, (2) cômodos com dimensões que comportem a realização das atividades do dia a dia de forma adequada e (3) espaço suficiente para comportar o mobiliário mínimo com circulação adequada entre eles, podemos concluir que essas habitações são pouco funcionais. As moradias estudadas não satisfazem plenamente a esses critérios.

Por essas razões, Palhares (2001) considera que o processo de criação e produção de habitações para a população de baixa renda precisa ser revisto, e que é imprescindível que essa revisão seja fundamentada na avaliação crítica das experiências já consolidadas, ou seja, a partir de estudos pós-ocupação em empreendimentos habitacionais desse tipo. Além disso é importante que sejam desenvolvidas estratégias para compensar a lacuna na conexão entre as construtoras e o usuário.

### **2.3 Customização em massa no contexto da habitação**

Como vimos anteriormente, muitas vezes os beneficiários de uma moradia social se deparam com residências extremamente padronizadas, com ambientes muito reduzidos, insuficientes para o mobiliário e para a circulação. O Brasil, é um país com enorme diversidade cultural, portanto um mesmo grupo socioeconômico pode apresentar características diversas em relação a composição familiar e conseqüentemente possuem diferentes necessidades e formas de utilização dos ambientes da casa.

Em empreendimentos desse tipo, o contato direto com os usuários e a participação dos mesmos no processo não é priorizada, por isso é importante que sejam desenvolvidas propostas arquitetônicas que possibilitem alternativas de flexibilização. A flexibilidade é “um mecanismo efetivo para compensar a lacuna na conexão entre o arquiteto e o ocupante desconhecido” (BRANDÃO, 2011, p. 76).

A flexibilidade é uma condição da forma arquitetônica alcançada a partir da aplicação de estratégias projetuais voltadas para a organização espacial e sistemas construtivos. A depender das estratégias arquitetônicas adotadas, suas formas de aplicação são agrupadas dentro de duas grandes categorias: a flexibilidade inicial e flexibilidade contínua. A flexibilidade inicial ocorre quando é essa oferecida ao futuro morador antes da ocupação da residência, ou seja, a partir da escolha ou customização da planta ou possibilidade de customizar o projeto durante a obra, por exemplo. E a flexibilidade contínua ocorre quando o projeto possibilita e

facilita eventuais modificações por parte dos moradores ao longo do tempo. (BRANDÃO, 2011).

A CM se configura como um método que oferece flexibilidade inicial. Os sistemas de CM representam uma integração entre *design*, produção e comercialização. Contando com o envolvimento do cliente durante a escolha dos componentes que compõem as unidades habitacionais permite uma ampla gama de tipologias projetuais (TAUBE e HIROTA, 2017).

Apesar da produção em massa de produtos idênticos reduzir significativamente os custos, os resultados limitam as escolhas individuais. Por outro lado, a customização permite a produção personalizada de acordo com a demanda do consumidor, mas os custos costumam ser altos. Uma combinação dessas duas estratégias pode fornecer variantes de produto e manter os custos reduzidos (GAZEL, *et al.* 2018, p.2)

A customização em massa é uma estratégia de negócios que possibilita às empresas proporcionarem aos clientes uma gama de opções de produtos com base em necessidades específicas, com custos e tempo de entrega similares ao alcançado na produção em massa como é esquematizado na **Figura 5**.

**Figura 5** – Comparação entre produção em massa, customização e customização em massa



Fonte: Taube e Hirota, 2017

A sistematização das etapas que consistem na definição de estratégias relacionada à CM a ser utilizada pelas empresas definida por Noguchi (2004) descrita a seguir:

(a) **identificação das necessidades:** entender a demanda de habitação, ou seja, eliminar as incertezas;

- (b) **formulação dos objetivos e especificações:** elaborar as especificações;
- (c) **geração das alternativas:** apresentar alternativas que contribuam para CM;
- (d) **avaliação das alternativas:** analisar o valor das alternativas, não só os custos que envolvem o produto, mas também necessidades, desejos e expectativas dos clientes; e
- (e) **seleção das alternativas:** entender os valores reais das alternativas.

Sabe-se que o contexto da HIS é muito mais complexo do que a fabricação de outros produtos de forma industrializada. Entretanto, a literatura aponta estudos que tem recorrido à CM para atender o mercado da habitação no qual os usuários possuem uma grande diversidade de necessidades (TAUBE e HIROTA, 2017).

Para os Brasil e Franco (2019), uma alternativa para viabilizar financeiramente a customização em massa na construção civil é a criação de sistemas construtivos alternativos baseados na divisão da edificação em peças menores que podem ser facilmente interligadas. Para Santiago *et. al* (2010) a industrialização na construção civil é fundamental para suprir as necessidades da produção de moradias em larga escala dentro dos prazos estimados pelo governo.

O autor defende que dificilmente o déficit habitacional brasileiro poderá ser sanado utilizando somente os modelos de construção civil tradicional “devido, dentre outros fatores, à pouca disponibilidade de mão-de-obra e à lentidão intrínseca dos sistemas artesanais, que tornam a execução de moradias muito lenta e pouco produtiva” (SANTIAGO *et al*, 2010, p.2). Por isso é interessante que os sistemas construtivos industrializados sejam explorados.

Além dos sistemas construtivos, quando voltado para a habitação, a customização em massa também está relacionada à variedade de tipologias. E a diversificação do projeto das unidades habitacionais está diretamente ligada à necessidade de satisfazer de forma plena as necessidades e desejos das pessoas que irão habitar essas moradias.

No sentido de reduzir e agilizar essas tarefas repetitivas dentro de composições complexas e ampliar as possibilidades de edição dentro do meio digital, existe a possibilidade de os projetos serem desenvolvidos por meio da *modelagem paramétrica* e o uso de *algoritmos evolutivos* implementados nas fases de geração de alternativas e avaliação de alternativas. Eles podem ser usados a fim de promover a automação de uma parte do processo, desenvolver sistemas construtivos, e aumentar o número de possibilidades de configurações espaciais e viabilizar simulações de desempenho de acordo com critérios pré-estabelecidos de forma mais eficiente, por exemplo (FILHO e MENDES, 2018). Essas possibilidades serão verificadas a partir de exemplos de experimentos no capítulo 5.

Se tratando da flexibilidade contínua, essa pode ser obtida por diferentes estratégias como: “pelo uso múltiplo de espaços – através da neutralidade dos compartimentos; da alteração entre a relação dos espaços por períodos limitados; ou pela sobreposição das funções nos ambientes – e pela alteração das características físicas da habitação” (LOGSDON *et al.*, 2019, p. 1553).

Estas formas de aplicação da flexibilidade podem ser encontradas em conjunto ou individualmente. Um projeto pode ter caráter evolutivo – que visa a ampliação futura – e não oferecer possibilidades de adaptações internas, por exemplo. Certamente, quanto mais estratégias adotadas, mais flexível é o projeto. No entanto, as intenções do projetista podem ser ponderadas e justificadas em função do atendimento às necessidades do público-alvo e demais condicionantes. (LOGSDON *et al.* 2019, p. 1554 e 155).

Entretanto, quando se trata do uso de *sistemas generativos* na arquitetura – mais especificamente *parametrização* e *algoritmos evolutivos* –, desenvolver um projeto que proporcione flexibilidade contínua é um desafio mais complexo, e essa ainda é uma abordagem pouco explorada. Isso acontece, pois, os parâmetros que envolvem esse tipo de flexibilização são mais subjetivos e por natureza, os *algoritmos* processam parâmetros objetivos.

É mais comum observarmos a criação de *algoritmos* relacionados ao desempenho quantitativo (acústico, térmico, luminoso) mas há uma carência de *algoritmos* voltados para solucionar problemas com critérios qualitativos, a partir das relações do ser humano com o ambiente (BRÍGITTE e RUSCHEL, 2018). Por essa razão, a customização em massa será o tipo de flexibilidade a ser analisados de modo mais atencioso nos exemplos de projeto no capítulo 5.

### 3 SISTEMAS GENERATIVOS DE PROJETO

Os primeiros estudos sobre os *sistemas generativos* no século XX tiveram início nas décadas de 1950 e 1960 com o intuito de desenvolver estratégias para a solução de problemas. Eles surgiram paralelamente ao desenvolvimento da ciência da computação, inteligência artificial e pesquisa operacional (MARTINO, 2015). De maneira geral, os *sistemas generativos* se caracterizam como uma ferramenta de exploração de resultados em projetos de arquitetura, *design* e engenharia na qual o sistema possui algum nível de autonomia para produzir a solução para o problema de projeto (ABRISHAMI, 2013; FAGUNDES, 2019).

Ao invés do ponto de partida ser a proposição final de soluções, o arquiteto passa a operar primeiramente na formalização dos problemas e na definição de estratégias eficientes para resolvê-los, dessa forma a solução será orientada por metas e poderá ser aplicada para resolver problemas semelhantes em contextos diferentes (MARTINO, 2015; CELANI *et. al* 2013).

Sendo assim, um sistema generativo pode ser utilizado de duas formas: visando à otimização (convergência) ou à variedade (divergência), ambas por meio da geração de múltiplas alternativas criando um espaço de soluções formado por um conjunto de soluções possíveis com respostas que podem ou não ser satisfatórias para uma situação específica. Por isso, em geral, os procedimentos sistemáticos incluem o uso de parâmetros e a avaliação de condicionais (CELANI, 2011),

Fagundes (2019) ressalta que um mecanismo generativo pode ser constituído por um ou mais *sistemas generativos* a depender da taxonomia do problema e da tipologia dos resultados desejados, mas a estrutura básica dos *sistemas generativos* é apresentada no diagrama a seguir **(Figura 6)**.

**Figura 6** – Estrutura de funcionamento de um sistema generativo



Fonte: Martino, 2015

A aplicação do sistema pode ser dividida em três situações, como destacam Celani *et al.* (2013):

a) Otimização: ocorre quando há certo problema de projeto que está bem definido entretanto não existe um método direto para encontrar uma solução, sendo assim é necessário testar todas as possibilidades a fim de encontrar a melhor alternativa

b) Geração de famílias de objetos: quando se busca um grande número de soluções similares que apresentam pequenas variações entre si.

c) Exploração: possui a função de criar várias possibilidades quando os critérios de necessidades do projeto não estão bem estabelecido, para isso é necessário gerar múltiplas possibilidades a fim de encontrar a solução satisfatória.

O uso de *sistemas generativos* não é algo recente no processo de projeto. No entanto, os meios digitais permitiram novas abordagens, para a exploração de novas formas, geometrias e maneiras de formalização de uma ideia (FAGUNDES, 2019). Diante da diversidade de possibilidades alguns estudos buscam classificar os *sistemas generativos* que costumam ser separados em dois grupos: os sistemas baseados na lógica e os sistemas inspirados na biologia

como é demonstrado a seguir com base na classificação proposta por Knight (KNIGHT 2011, *apud* CELANI *et al*, 2013):

Sistemas baseados na lógica:

- a) Simetria;
- b) Combinatória;
- c) *Parametrização*;
- d) Grafos;
- e) Gramática da forma.

Inspirados na biologia:

- a) Fractais;
- b) Autômatos celulares;
- c) Sistemas auto organizados;
- d) *Algoritmos evolutivos*.

Sobretudo, dentre os vários *sistemas generativos* optou-se por estudar os métodos da *modelagem paramétrica*, e os *algoritmos evolutivos*, uma vez que esses processos são compatíveis com a problemática levantada neste trabalho. Tais métodos serão estudados nos exemplos de experimentos e servirão como norte para o decorrer da pesquisa.

### **3.1 *Parametrização***

Os *sistemas generativos* existem há várias décadas, “a novidade é que hoje possuímos instrumentos com capacidade de processamento suficiente para tornar esta abordagem uma realidade concreta e uma alternativa viável para o desenvolvimento de projetos” (BIANCA, 2017). A *parametrização* é um dos fatores que atua em favor da aplicação desses sistemas na arquitetura.

É importante ressaltar que os arquitetos sempre produziram *modelos paramétricos*, visto que “todo projeto, necessariamente, deriva de parâmetros, tais como normas referentes aos índices urbanísticos de uso e ocupação do solo, das propriedades dos materiais, entre tantos outros”. (CRUZ, 2018, p. 28). Portanto, nessa nova abordagem o ponto chave não é a presença de parâmetros em si, mas sim as relações interdependentes que existem entre eles visto que “na *modelagem paramétrica*, os projetos não são mais desenhados, mas sim programados a partir de relações geométricas e matemáticas. Isso permite a construção de espaços mutáveis” (CRUZ, 2018, p. 29).

Dessa forma os *modelos paramétricos* se diferenciam das tradicionais maquetes 3D pois são representados através de parâmetros e regras que determinam sua geometria e permitem atualizações e mudanças de contexto em qualquer etapa do processo de forma automática quando uma variável é alterada (**Figura 7**) sem a necessidade de refazer passos já realizados ou prejuízo a estrutura existente. Os *modelos paramétricos* são modelos de geometria mutáveis. “Quando aplicada com objetivo generativo, aumenta a probabilidade de ocorrências aleatórias, resultando num maior número de soluções” (BRÍGITTE e RUSCHEL, 2018). Uma das formas de se realizar este processo é através da utilização de ambientes de programação visual para modelagem.

**Figura 7** – Modelos gerados a partir da variação dos dados de entrada em um *modelo paramétrico*



Fonte: Cruz, 2018

### 3.2 Algoritmos evolutivos

O termo *algoritmo evolutivo* está relacionado a um conjunto de métodos que são caracterizados por apresentar mecanismos de busca, otimização, aprendizagem e modelagem e tem como referência os mecanismos de adaptação encontrados na natureza, seu funcionamento

é inspirado na evolução biológica. “Os principais métodos que o compõem são o *Algoritmo genético* (GA - *Genetic Algorithm*), a *Estratégia Evolutiva* (ES - *Evolution Strategy*) e a *Programação Evolutiva* (EP - *Evolutionary Programming*)” (MARTINO, 2015, p. 42). Apesar de terem sido desenvolvidos com objetivos específicos distintos e possuírem características que os diferenciam, atualmente esses métodos são classificados de forma geral como *algoritmos evolutivos* em função da possibilidade de combinação entre os seus componentes que são estruturados a fim de atender um propósito (MARTINO, 2015).

Uma das principais características dessa classe de *algoritmos* é a sua capacidade de resolver problemas complexos, satisfazendo diversas variáveis simultaneamente de forma satisfatória. “Isso se deve ao fato de que os cientistas da área da inteligência artificial identificaram no fenômeno evolutivo presente na natureza uma situação capaz de auxiliar no processo de solução de problemas” (MARTINO, 2015, p. 43). O conceito matemático de otimização permitiu que fosse criada uma maneira concreta de explorar essa questão. Segundo Nagy (2017), ao reformular o processo evolutivo fundamentalmente como um processo de otimização cria-se a possibilidade de aplicar as ferramentas fornecidas pela ciência da computação para sistematizar métodos semelhantes em nossos próprios processos de *design*.

Na matemática, um problema de otimização é descrito por três componentes (Nagy, 2017):

1. Um vetor de dados de entrada (*inputs*) que descreve todos os projetos possíveis em um sistema.
2. Um conjunto de funções objetivo que estabelecem as metas do sistema com base na minimização ou maximização dos valores dessas funções
3. Um conjunto de funções de restrição que estabelecem os limites do sistema

Podemos ver facilmente como o processo de evolução na natureza também é uma espécie de processo de otimização. Dado o modelo de uma espécie, a seleção natural tentará produzir novos indivíduos que se adaptem melhor aos objetivos e restrições de seu ambiente. O vetor de entrada, neste caso, é o genoma do indivíduo, que descreve as características únicas desse indivíduo. As funções objetivas vão sobreviver e viver o maior tempo possível para ter a melhor chance de reprodução. As restrições são os limites físicos do organismo que restringem as formas que ele pode assumir. (NAGY, 2017, n.p).

Os *algoritmos evolutivos* atingem seus resultados a partir da busca através de técnicas aleatório-guiadas que “correspondem a métodos que utilizam componentes aleatórios e informações do estado corrente para orientar a sua busca e exploração em um conjunto de soluções, o que os diferencia de outras técnicas completamente aleatórias” (MARTINO, 2015, p. 44).

### 3.2.1 Inspiração Na Natureza: A Teoria Da Evolução Das Espécies

O processo evolutivo presente na natureza foi descrito originalmente por Charles Darwin em 1859. A evolução é um processo que opera a nível de espécie, e sabe-se que cada indivíduo é único, mas todos os membros de uma mesma espécie apresentam características em comum e possuem uma habilidade importante: são capazes de se reproduzir e gerar novos indivíduos. Ao longo do tempo a reprodução associada ao processo evolutivo garante a sobrevivência e adaptação da espécie em relação ao meio ambiente a partir de um mecanismo chamado seleção natural, que é composto de basicamente 3 passos:

1. Seleção, na qual os membros de uma espécie competem por recursos limitados, e apenas aqueles que estão mais bem adaptados ao seu ambiente sobrevivem;
2. Reprodução, em que os sobreviventes se reproduzem para criar novos filhotes que compartilham algumas de suas características;
3. *Mutação*, na qual algumas das características da prole são alteradas aleatoriamente.

A seleção natural pode ser entendida como a sobrevivência dos mais aptos em um determinado ambiente, sendo assim, os que têm melhor desempenho sobrevivem. Os *algoritmos evolutivos* correspondem a uma metáfora desse mecanismo, as características que corroboram essa relação são sintetizadas na **Figura 8** e descritas por Martino:

Os *algoritmos evolutivos* possuem uma estrutura básica constituída por populações de indivíduos (representando as possíveis soluções de um problema), operadores de diversidade (responsáveis pelo processo de diversificação dos indivíduos ao gerar as populações) e a função de aptidão dos indivíduos (verificando o grau de satisfação das soluções obtidas com relação ao objetivo-problema). (MARTINO, 2015, p. 33).

**Figura 8** – Estrutura básica dos *algoritmos evolutivos*

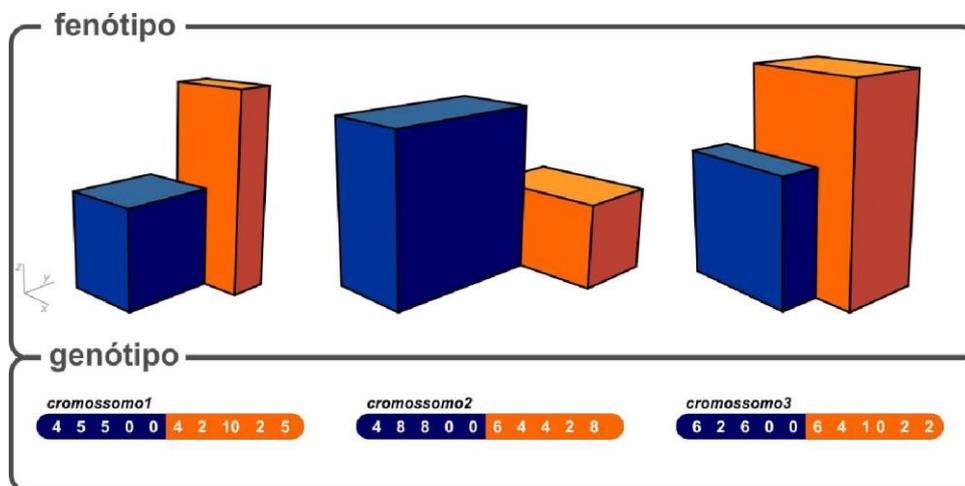


Fonte: Martino, 2015

Outro componente importante no processo evolutivo, é a relação entre *genótipo* e *fenótipo*, sendo o *genótipo* o DNA, que codifica toda a informação de um indivíduo, e o *fenótipo* é expressão física do organismo que “resulta da interação do *genótipo* com as características do meio ambiente” (MAYER, 2012, p. 59). “No processo evolutivo, a reprodução e a *mutação* operam no *genótipo*, enquanto a competição e a seleção ocorrem no nível do *fenótipo*” (NAGY, 2017).

Fazendo uma análise comparativa com as edificações Mayer (2012) conclui que esse conceito pode ser útil para demonstrar a importância das estruturas generativas na constância ou variabilidade de edifícios e as diferenças e semelhanças fenotípicas resultantes da interação com o ambiente, ideia tal que pressupõe o entendimento do objeto arquitetônico como uma população, ou seja, é entendido como um conjunto de soluções formais (indivíduos) únicas que compartilham características gerais. A **Figura 9** demonstra essa relação.

**Figura 9** – Diferentes indivíduos obtidos a partir da variação dos parâmetros



Fonte: Martino, 2015

Mayer afirma que “esse conjunto de elementos forma um todo que caracteriza um espaço de possíveis alterações. O objeto é o resultado da interação da população de suas partes e as possibilidades de sua forma aparente” (MAYER, 2012, p. 61). Em ciências computacionais, a ideia de procura entre uma coleção de soluções candidatas à solução desejada é denominada, como espaço de procura (MITCHELL, 1999). Em relação a esse conceito, Mayer (2012) explica que o espaço de procura contém a solução codificada (genótipo, espaço onde os algoritmos agem) e o espaço de solução contém a solução decodificada (fenótipos). Existem ainda os chamados operadores de diversidade, cujo nome já indica que são os mecanismos responsáveis

por gerar variedade nas populações, contribuindo significativamente para a exploração do espaço de soluções e para a busca das melhores soluções. Os operadores de diversidade mais comuns são a *mutação*<sup>3</sup> e a *recombinação*<sup>4</sup>.

---

<sup>3</sup> A *mutação* tem como objetivo alterar aleatoriamente o gene do cromossomo de um indivíduo a fim de transformá-lo em outro, contribuindo para a diversidade genética, inserindo novos cromossomos na população e ampliando os limites estabelecidos pela geração inicial (MARTINO, 2015, p. 54).

<sup>4</sup> A *recombinação* é a troca de partes entre dois ou mais “cromossomos pais” durante o processo de cruzamento para a geração dos “cromossomos filhos” que irão compor a próxima geração. (MARTINO, 2015, p. 55).

## 4 PROCESSOS DE PROJETO COM O USO DE *ALGORITMOS*

Os *sistemas generativos* podem ser utilizados para gerar plantas arquitetônicas, gerar de superfícies e volumetria, solucionar a implantação da edificação no terreno, elaborar de traçado urbano e fazer cálculos para projeto estrutural, por exemplo. Dentro de cada uma dessas áreas de projeto o *design* pode ser desenvolvido a partir de um ou mais critérios de otimização que variam muito dependendo da necessidade. A título de exemplo, podem ser critérios de otimização: dimensões mínimas para cômodos de uma casa e a relação de adjacência entre eles, eficiência termo energética, aumento de conforto acústico, redução de custo de material, diminuição de peso estrutural, sustentabilidade, tamanho e hierarquia entre vias, adensamento máximo de lotes em um bairro, e muitos outros.

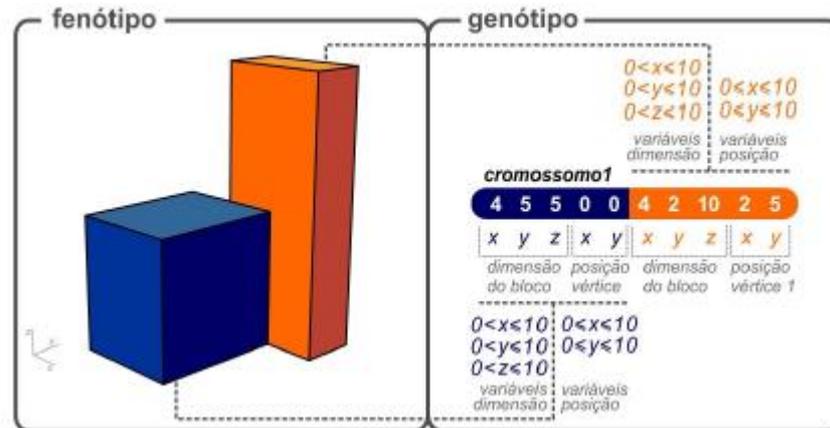
Com o avanço das ferramentas de *design* digital e a implementação de novas metodologias generativas é possível gerar inúmeras opções de projeto contribuindo para aumentar a customização e a flexibilidade como vimos nos tópicos 2.3. Nesse capítulo vai ser estudado de forma geral as características de um processo de projeto com base em *sistemas generativos*, mais especificamente, com o uso de *algoritmos evolutivos*.

### 4.1 Os componentes e o processo

Os *algoritmos evolutivos*, no geral, são constituídos pelos seguintes componentes: a representação dos indivíduos, as populações, a função de avaliação (*fitness function*), os mecanismos de seleção, os operadores de diversidade (mutação e recombinação) e o tempo de duração ou o número de gerações dos *algoritmos*, e como vimos anteriormente esses componentes constituem um processo que busca imitar simulação de uma seleção natural para a obtenção da próxima geração (MARTINO, 2015).

O primeiro componente a ser considerado é a representação (**Figura 10**). Esse componente seria correspondente ao DNA humano, são as instruções de como o indivíduo se comporta e suas características, é a codificação dos indivíduos que pode ser feita de diversas maneiras números binários (zeros e uns), inteiros, reais, caracteres e outros. Esse processo é muito importante e a escolha de uma codificação não adequada pode acarretar em resultados insatisfatórios quando o *genótipo* é traduzido para o *fenótipo* ou quando são aplicados operadores de diversidade (MARTINO, 2015)

**Figura 10** – Exemplo de codificação de um indivíduo

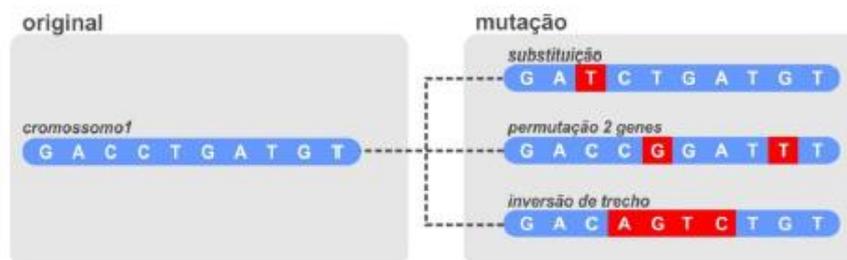


Fonte: Martino, 2015

A população inicial é constituída por indivíduos gerados automaticamente pelo algoritmo e escolhidos aleatoriamente a partir do conjunto de possíveis soluções. A quantidade de soluções que compõe essa população é previamente estabelecida. Em relação aos operadores de diversidade, como o nome já indica, são os mecanismos responsáveis por gerar variedade nas populações, contribuindo significativamente para a exploração do espaço de soluções e para a busca das melhores soluções. Os operadores de diversidade mais comuns são a mutação e a recombinação. (MARTINO, 2015).

“A mutação tem como objetivo alterar aleatoriamente o gene do cromossomo de um indivíduo a fim de transformá-lo em outro, contribuindo para a diversidade genética, inserindo novos cromossomos na população” (MARTINO, 2015, p.54). Esse processo é demonstrado na **Figura 11**.

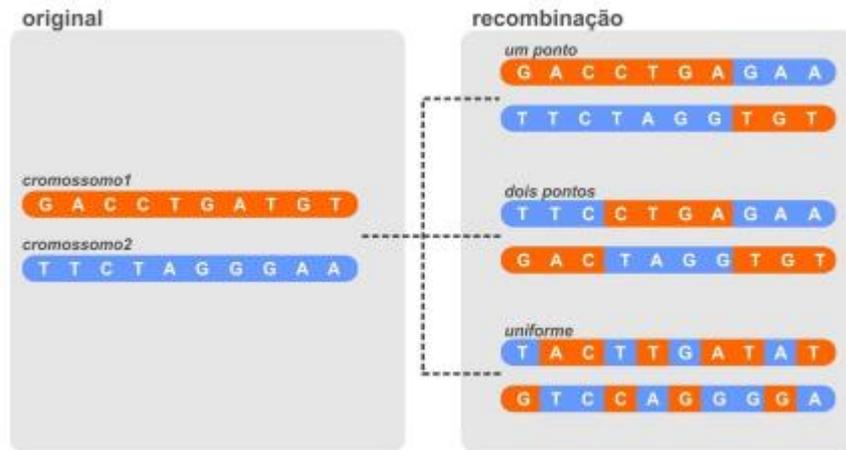
**Figura 11** – As três formas de mutação em um algoritmo genético



Fonte: Martino, 2015

Já a “recombinação é a troca de partes entre dois ou mais “cromossomos pais” durante o processo de cruzamento para a geração dos “cromossomos filhos” que irão compor a próxima geração” (MARTINO, 2015, p.55) como podemos ver na **Figura 12**.

**Figura 12** – Tipos de recombinação



Fonte: Martino, 2015

O processo de seleção por sua vez consiste na “sobrevivência” dos indivíduos que estão mais bem adaptados às condições e restrições. Os responsáveis por essa análise são os operadores de avaliação (*fitness function*) e seleção. O primeiro que verifica o quanto cada indivíduo atende às condições e restrições e o segundo os classifica os indivíduos e os selecionam para a próxima geração respectivamente (MARTINO, 2015; NAGY, 2017).

O último componente do processo é a duração, que consiste exatamente no intervalo de tempo em que o algoritmo vai ser executado. O tempo pode ser estipulado em minutos ou horas caso haja um tempo máximo de processamento do computador, ou então pode ser definida pela quantidade de gerações, ou seja, quando o processo produzir X gerações, o algoritmo para de ser executado. Há ainda um terceiro caso no qual o tempo está relacionado à solução ideal. Sendo assim, a duração e a quantidade de gerações são imprevisíveis, e o algoritmo vai parar de rodar somente quando encontrar a solução que atenda plenamente a todos os critérios previamente definidos (MARTINO, 2015).

A **Figura 13** demonstra de forma sintética por meio de um fluxograma a relação do resultado da atuação de cada componente do algoritmo evolutivo como um processo de projeto constituído pelos seguintes passos: análise, síntese, avaliação e definição. Para Martino (2015) é possível verificar que mesmo automatizando uma parte do processo o arquiteto não deixa de tomar

decisões, sendo ele responsável por definir as formulações para o *fitness function*, modelando os critérios conforme sua intenção projetual.

**Figura 13** – Mapeamento do processo de projeto com algoritmo evolutivo

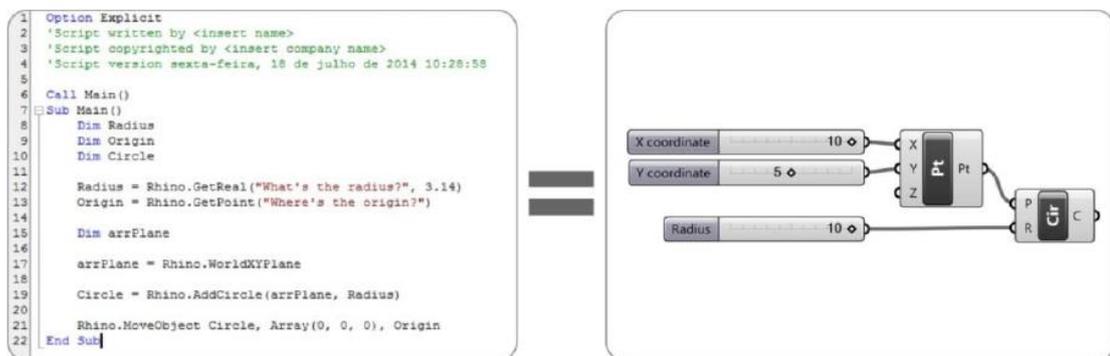


Fonte: Martino, 2015

## 4.2 As ferramentas

A adoção de um processo de projeto embasado no pensamento algorítmico e na *parametrização*, exige o uso da lógica computacional e da linguagem de programação. A implementação de um sistema generativo pode ser feita de duas formas: (1) em uma linguagem de programação por código textual ou (2) por meio de *softwares* que apresentam uma interface de programação visual (MARTINO, 2015). A diferença entre as duas formas é mostrada na **Figura 14**.

**Figura 14** – Programação utilizando linhas de código e componentes visuais



Fonte: Martino, 2015

A implementação feita em uma linguagem de programação por código textual pode ser feita em uma linguagem de programação genérica ou em um ambiente de CAD que permite sua manipulação por meio de um *script*. O *AutoCAD* é um exemplo de pacote CAD que possui

ambiente de desenvolvimento de *scripts*. Outros *softwares* para modelagem geométrica também utilizam a linguagem *script* para descrever procedimentos, tais como o *Rhinoceros* com o *Rhinoscript*, o *Maya* com o MEL e o *3DMax* com o *MaxScript*.

Alguns *softwares* como o *Generative Components*, o *Dynamo* (*plug in* para o *Revit*) e o *Grasshopper* (*plug in* para o *Rhinoceros*), ao invés de apresentarem uma interface para escrever o código em texto utilizam componentes visuais com funções específicas previamente configuradas que podem ser introduzidos em uma área de trabalho para compor o código (MARTINO, 2015), tornado o processo mais intuitivo e facilitando sua utilização por usuários que não são programadores. Segundo Giz e Queiroz (2017) a modelagem a partir da linguagem de programação visual (VLP) vem se tornando popular entre os projetistas.

O modelo visual do fluxo dos dados nesses *scripts* é demonstrado com base em nós (funções computacionais que executam determinada ação) e links (*input* – dados de entrada, e *output* – dados de saída). De maneira geral, um ou mais nós representam uma etapa da modelagem. Cada nó possui um *input* específico e, após a execução da ação de modelagem, gera um *output*. Este último, pode servir de novo *input* para outros nós, que representam outras etapas da modelagem que compõem a rotina. Assim, todo o processo gera um diagrama que mostra o sistema de fluxo de dados (GIZ e QUEIROZ, 2017, p.3)

Alguns desses programas possuem ainda *plug-ins* específicos para implementação dos *algoritmos evolutivos* como é o caso do *Galapagos* (*plug in* para o *Grasshopper*) que permite a implementação dos *algoritmos evolutivos* de forma mais simplificada.

## 5 PANORAMA DA PRODUÇÃO: EXEMPLOS DE CASOS

Os exemplos de casos têm como objetivo apresentar e exemplificar a implementação dos *algoritmos evolutivos* como um método de projeto. Cada um dos casos apresentados corresponde a exercícios de projeto desenvolvidos por diferentes autores. Os experimentos apresentados a seguir foram escolhidos neste estudo por apresentarem processos e/ou objetivos voltados para a customização em massa na habitação de interesse social, seja a partir do desenvolvimento de sistemas construtivos (fabricação digital) ou geração de arranjos espaciais utilizando da *modelagem paramétrica e sistemas generativos* de projeto.

### 5.1 Fabricação digital

Os sistemas construtivos tradicionais a exemplo da alvenaria, são sistemas que podem ser considerados pouco produtivos, uma vez que são lentos e necessitam de muita mão de obra para sua execução. Frente a isso, acredita-se que para suprir a demanda brasileira por construções e assim contribuir para sanar déficit habitacional, utilizar somente tecnologias manufatureiras não é suficiente (SANTIAGO *et al*, 2010). Por isso a industrialização da construção civil por meio de sistemas construtivos industrializados deve ser considerada.

Em sua tese, Pupo (2008) se refere à terminologia fabricação digital como um método que permite a transição do modelo digital para o físico de maneira automatizada. As cortadoras a laser (equipamentos utilizados para a fabricação digital) realizam a produção de objetos em 2D, sendo necessário a posterior montagem das peças para a criação do objeto em formato 3D.

Em contraposição ao paradigma da repetição imposto pela *produção em massa*, a fabricação digital permite produzir de maneira muito mais rápida e discutir o conceito de *personalização em massa*. Por ser uma abordagem a partir a *parametrização* permite o desenvolvimento do desenho preciso dos elementos que compõe cada peça, assim como a alteração facilitada das características desses elementos podendo fazer uso de *algoritmos* para otimizar o processo (FILHO e MENDES, 2018).

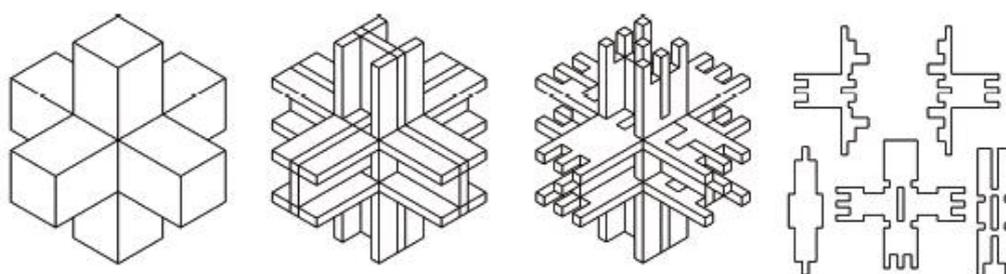
#### 5.1.1 Customizing Mass Housing in Brazil: Introduction to an Integrated System

O trabalho em questão apresenta um sistema construtivo de madeira parametrizado, desenvolvido a partir de uma simulação computacional com o auxílio de *algoritmos*. O principal objetivo da pesquisa era desenvolver um sistema construtivo visando a automação de processos

que viabilizam a customização em massa de habitações de interesse social no Brasil (BRASIL e FRANCO, 2019).

Para os autores, uma alternativa para viabilizar financeiramente a customização em massa na construção civil é a criação de sistemas construtivos alternativos baseados na divisão da edificação em peças menores que podem ser facilmente interligadas. O sistema construtivo é baseado na união peças bidimensionais que se conectam a partir de encaixes do tipo macho-fêmea formando peças tridimensionais como é demonstrado na **Figura 15**.

**Figura 15** – Processo de criação das peças do sistema construtivo



Fonte: Brasil e Franco, 2019

Para alcançar os resultados desejados, foram realizadas três etapas: 1) concepção do projeto do sistema construtivo, 2) automação dos processos de projeto e produção e 3) verificação da viabilidade do processo. A automação do projeto do sistema construtivo foi possível através de sua *parametrização* em ambiente CAD. O modelo 3D foi construído no *software Rhinoceros* com o auxílio do *plug in* de programação visual *Grasshopper*.

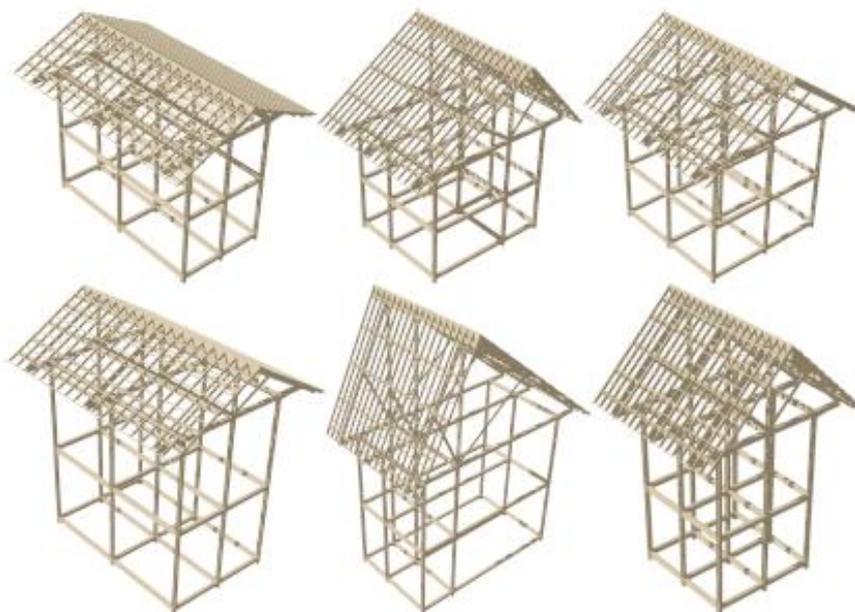
O resultado do trabalho gerou um sistema de construção composto basicamente por 4 categorias de componentes: estrutura, piso, paredes e teto. O algoritmo é alimentado por dois tipos de parâmetros: os parâmetros de projeto arquitetônico e componentes construtivos. Para cada uma das famílias de componentes, existem parâmetros específicos como é descrito a seguir:

Os parâmetros do projeto arquitetônico são aqueles que definem a posição do ponto usada para construir linhas de referência para posicionar os componentes. Em seguida, essas linhas funcionam como referências para definir as coordenadas para construir elementos 2D que, juntos, formam componentes 3D. O usuário controla os parâmetros de projeto de arquitetura e alguns parâmetros de componentes (variáveis livres), enquanto outros parâmetros de componentes são regulados automaticamente de acordo com os parâmetros de projeto de arquitetura (variáveis dependentes). Neste

sistema generativo, todos os parâmetros relacionados ao elemento são variáveis dependentes. (BRASIL e FRANCO, 2019, p. 609)

A *modelagem paramétrica* dos componentes permitiu por meio de simulações nos *softwares* prever o desempenho estrutural dos componentes com base no projeto de tensão permissível. A **Figura 16** ilustra o processo de simulação da performance estrutural.

**Figura 16** - Variações de projeto geradas com o algoritmo desenvolvido



Fonte: Brasil e Franco, 2019

Os resultados desta pesquisa sugerem que os *algoritmos* implementados em *sistemas generativos* com base em modelos paramétricos podem ser “integrados para possibilitar a customização em massa de habitações sociais por meio do desenvolvimento inicial de um sistema de construção e pavimentação” (BRASIL e FRANCO, 2019, p.7).

Como vimos no tópico 2.2, na produção de moradia pelo PMCMV a padronização de processos está atrelada à padronização de soluções de projeto, mesmo que essa não seja obrigatória. Essa situação se torna um impeditivo de flexibilização e variedade tipológica. O sistema construtivo quando dividido em pequenos componentes permite um grau de customização muito alto, as peças podem ser adaptadas a praticamente qualquer projeto. A adoção desse tipo de sistema poderia ser um facilitador para a customização das residências.

Esse sistema construtivo foi projetado para ser capaz de ser fabricado com tecnologia nacional. Além disso, foram consideradas diferentes variáveis que influenciam o processo de fabricação e montagem como: equipamento a ser utilizado para a fabricação, custo e disponibilidade de material. Essas diversas características permitem que o sistema construtivo

seja adaptado facilmente ao contexto no qual será aplicado, sendo o custo, a facilidade de montagem a possibilidade de trabalhar com materiais e equipamentos locais uns dos principais pontos a se considerar no contexto da HIS.

### *5.1.2. Edificação Modular: Estudo de caso e protótipo de um sistema construtivo de código aberto utilizando prototipagem rápida*

Este artigo apresenta o desenvolvimento de um sistema construtivo modular para a construção de habitações compactas por meio da *parametrização*, fabricação digital e implementação de *algoritmos evolutivos* que permitem a sua customização em massa. Esse sistema serviu de base para o projeto Casa Nordeste, um experimento de habitação compacta criado para participar da competição Solar Decathlon América Latina, “assim, optou-se por uma construção modular que evolui ao longo de um terraço - elemento típico da arquitetura nordestina, construída com base na adaptação do sistema de código aberto proposto pelo Wikihouse<sup>5</sup> (GRIZ e QUEIROZ, 2017, p.2)

O desenvolvimento do sistema parte de três diferentes aspectos de projeto do módulo estrutural: (a) geometria dos pórticos, (b) sua modulação, e (c) encaixes e mecanismos de junção sendo as duas primeiras partes desenvolvidas a partir de *algoritmos*, e na terceira é feito um estudo de prototipagem. Foi desenvolvido um algoritmo para a concepção preliminar da estrutura e um algoritmo para a concepção preliminar do sistema de encaixes.

Há parâmetros ligados à geometria, modulação e encaixe entre as peças. Alguns dos parâmetros que permitem variações da modelo são a dimensão dos vãos, pé direito, dimensão dos ambientes, inclinação da cobertura, largura das peças, espaçamento e quantidade de pórticos, seção dos pórticos, além da dimensão e espessura das placas de compensado que constituem dos componentes.

Este sistema estrutural dispensa parafusos ou colas. As conexões são todas feitas por encaixes e faz uso o de materiais baratos, recicláveis ou biodegradáveis. A facilidade de montagem e a fácil adaptação do projeto para climas, culturas e economias diferentes, proporciona um projeto de qualidade a um preço acessível, por isso o sistema possui potencial

---

<sup>5</sup> *Wikihouse* é uma plataforma em código aberto que apresenta três áreas de atuação: o desenvolvimento de um plugin para *software* gratuito que facilita o desenvolvimento do projeto; a construção de protótipos em escala real e; o desenvolvimento estrutural em madeira cortada na fresadora CNC e montadas com travamentos nas três direções. (GRIZ e QUEIROZ, 2017, p.2)

para beneficiar comunidades de baixa renda e construtores de HIS. Esse sistema favorece também a customização em massa (GRIZ e QUEIROZ, 2017)

Para explorar variações estruturais, lógicas distintas de segmentação de componentes e de junções que irão formar a Casa Nordeste, foram escolhidos dois plug-ins de programação o *Grasshopper* e o *Rhinoceros*. O *Grasshopper* é associado ao programa de modelagem 3D *Rhinoceros*, já o *Dynamo* interage com o *software* de tecnologia BIM – o *Revit*, sendo assim, possuem diferenças consideradas na modelagem fazendo com que os *scripts* e fluxo de trabalho para alcançar o mesmo objetivo sejam distintos.

Para a construção do modelo no ambiente BIM iniciou-se a modelagem no próprio *Revit* com a inserção de famílias carregáveis (pórticos, paredes, piso e teto), posteriormente o usuário pode manipular os parâmetros criados para essas famílias com o auxílio do *Dynamo*. Já no *Rhinoceros* a modelagem é construída inteiramente com o *Grasshopper*. “Essa característica faz com que o *script* seja inerentemente maior do que o gerado no *Dynamo*” (GRIZ e QUEIROZ, 2017, p.3).

O desenvolvimento do mesmo projeto em *softwares* diferentes é interessante pois permite identificar as vantagens e limitações de cada um. Outro ponto relevante é que esse projeto segue os princípios de construção em *open source* (ou código aberto). Isso significa que esse é um projeto que parte de uma premissa de colaboração, onde os modelos de desenvolvimento são compartilhados. O livre acesso às informações é importante pois permite o uso e adaptação do *script* por outras pessoas e estimula o aprendizado das ferramentas.

## **5.2 Definição de arranjos espaciais com o auxílio de *algoritmos***

### *5.2.1 Housing Agency System (HAS): multi-criteria satisficing & mass-customization of homes*

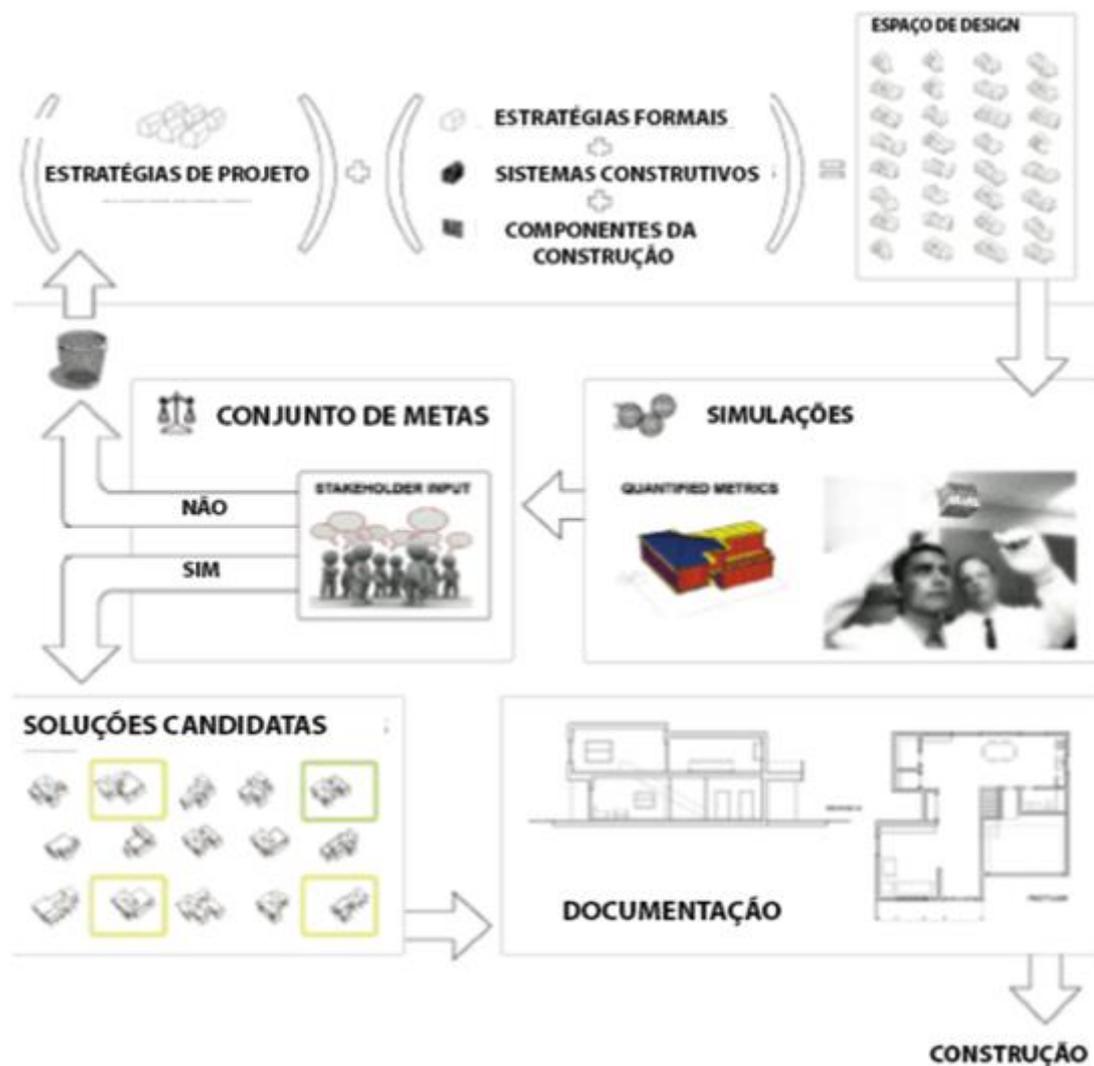
O *Housing Agency System* (HAS) foi pensado para atender as demandas do mercado da habitação nos Estados Unidos em um contexto no qual a produção habitacional do país tem sido majoritariamente executada a partir da produção em massa “usando métodos onde residências similares são copiadas, espelhadas e rotacionadas para criar comunidades padronizadas” (BERGIN e STAINFELD, 2012, p.1)

Os autores acreditam que os arquitetos teriam a capacidade de melhorar a qualidade desses ambientes, entretanto, não tem autonomia quanto ao projeto das residências (BERGIN e STAINFELD, 2012). Sendo assim, para tentar amenizar essas condições propuseram o

desenvolvimento do sistema denominado HAS. Esse sistema combina *algoritmos* de otimização multi-objetivo com *software* paramétrico de modelagem de informações de construção, no qual o arquiteto pode se envolver a partir da definição de condições e restrições que serão resolvidas algorítmicamente.

Essa é uma proposta que tenta manter as características da produção em larga escala, mas ao mesmo tempo visa aumentar o número de opções de residências disponíveis, ou seja, adota a estratégia da customização em massa. Essa customização tem como objetivo atender as necessidades individuais de cada família e condições específicas de cada localização, além de romper com a impessoalidade extrema dos conjuntos habitacionais causada pela padronização. A **Figura 17** mostra de forma diagramática o processo geral do HAS.

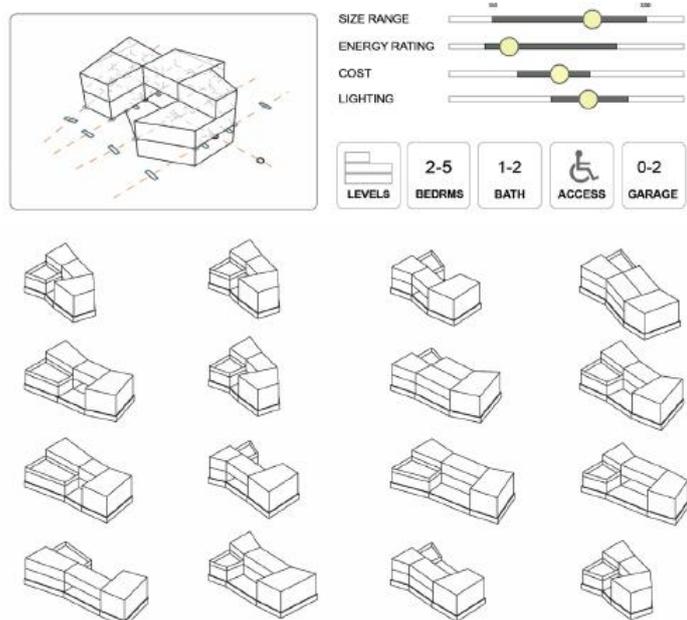
**Figura 17** – Diagrama do *Housing Agent System*



Alguns dos parâmetros utilizados para desenvolver o modelo são: topografia do terreno, (considerando acessos, vistas desejáveis, possíveis obstruções e valor de mercado); interação entre as várias unidades e seu impacto na comunidade em geral; condições climáticas; área total a ser construída; sistema construtivo; e componentes da construção como janelas, portas, escadas e outros. A elaboração do modelo com base nesses parâmetros permite fazer diversas simulação, na qual as opções são analisadas e avaliadas por conjuntos de metas.

Além disso a definição dos cômodos e a adjacência entre eles é determinada por um gráfico de bolhas simples construído junto com os clientes e depois de toda a análise é iniciada a fase de simulações a partir de requisitos mínimos (**Figura 18**).

**Figura 18** – Modelo gerado em *Grasshopper* mostrando parâmetros que possibilitam mudanças incrementais



Fonte: Bergin e Stainfeld, 2012

O HAS foi pensado para um perfil socioeconômico e cultural completamente diferente do contexto da HIS brasileira, entretanto, as questões que motivaram o desenvolvimento do sistema são muito similares às questões que foram discutidas anteriormente neste trabalho: a repetição de UHs padronizadas e falta de participação dos usuários nas decisões de projeto. O ponto chave desse experimento é que o HAS está sendo projetado para ser uma interface computacional interativa que permita a contato entre os profissionais e os clientes que desejam personalizações para sua residência de forma simplificada.

### 5.2.2 Projeto de Habitações de Interesse Social segundo uma abordagem generativa

Partindo do pressuposto de que a cidade é um organismo vivo em constante desenvolvimento essa pesquisa se desenvolveu com o objetivo de estudar as constantes modificações no espaço das favelas brasileiras para então identificar o que impulsiona essas transformações bem como deduzir padrões e regras que estão envolvidos nas dinâmicas de mudança ao longo do tempo.

O estudo em questão resultou na identificação de “ferramentas para servirem de base à um novo método projetual paramétrico generativo passível de ser aplicado na concepção de novos conjuntos habitacionais de habitação de interesse social” (ROMANO e TOLONI, 2011, p.593). Esse produto decorreu da análise morfológica, formal e espacial dos assentamentos informais que serviu de base para a criação de um algoritmo utilizando o programa *Grasshopper, plug-in do Rhinoceros*.

Para alcançar os objetos pretendidos foi desenvolvido um algoritmo decomposto em quatro partes, cada qual com objetivo distinto que será descrito a seguir e é esquematizado na **Figura 19**.

**Figura 19** – Função de casa algoritmo em cada etapa

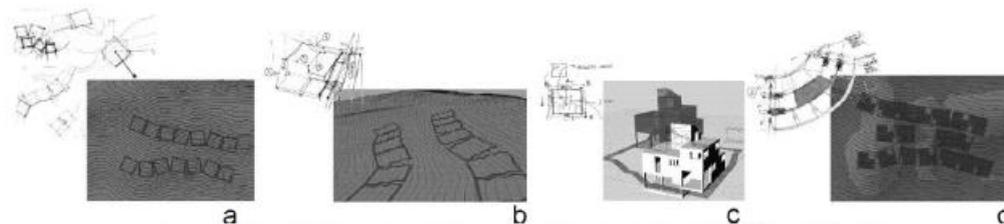


Fig. 4a - Algoritmo 1: Posicionamento dos lotes segundo a pendência mínima  
 Fig. 4b - Algoritmo 2: Dimensionamento das escadas de acesso aos lotes (pendência máxima)  
 Fig. 4c - Algoritmo 3: Disposição das unidades habitacionais no lote  
 Fig. 4d - Algoritmo 4: Disposição dos lotes formando uma unidade de vizinhança

Fonte: Romano e Tonoli, 2012

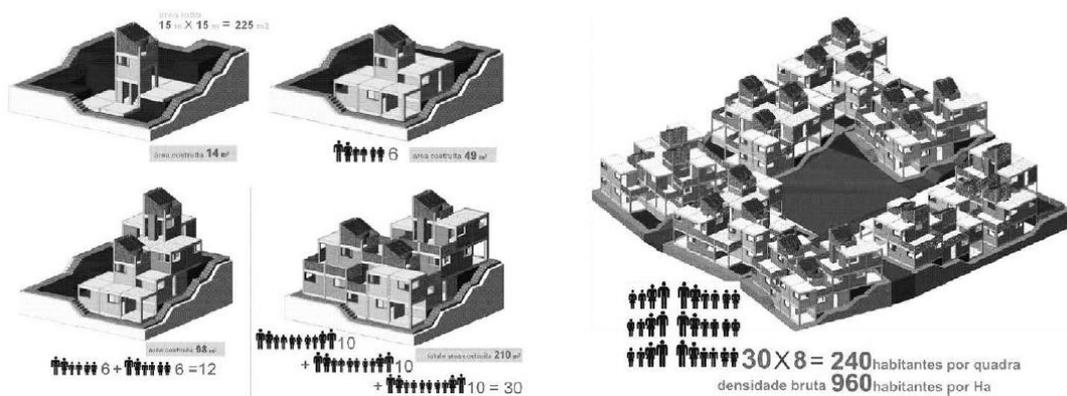
A primeira parte do algoritmo é responsável pelo posicionamento dos lotes sobre o terreno, determinando o traçado da via principal segundo uma inclinação mínima ao longo do qual serão posicionadas as unidades habitacionais. Já a segunda parte, é constituída por uma série de operações para definir os percursos de declividade máxima, a fim de estabelecer o posicionamento das escadas e dimensionamento das mesmas para que consigam vencer os desníveis do terreno de forma satisfatória.

A terceira parte define como as residências vão ser posicionadas em cada um dos lotes. Cada lote quadrado, poderá acomodar até três residências dispostas segundo variações

volumétricas diversas, cada uma sobre os seus respectivos patamares. “Cada unidade se desenvolve em torno de um corpo central que contém todo o sistema de abastecimento de água e de esgoto (para cozinha e banheiros), além dos painéis solares para o aquecimento da água e dos painéis fotovoltaicos para a geração de energia” (ROMANO e TONOLI, 2012, p.4).

Por fim, a quarta parte organiza espacialmente os lotes para formar uma unidade de vizinhança, formando quarteirões de 15x3 metros, baseada em uma regra de agrupamento que é repetida continuamente de forma a garantir uma área central não edificada para servir de uso comunitário. Sendo essa área central circundada por no máximo 24 residências. O resultado do processo é resumido na **Figura 20**.

**Figura 20** – Sucessivas fases de expansão das unidades habitacionais



Fonte: Romano e Tonoli, 2012

No contexto da HIS estudado neste trabalho as moradias não são construídas em terrenos isolados, elas sempre fazem parte de um conjunto habitacional. Em razão disso é relevante estudar a interação entre as várias unidades e seu impacto no entorno. O experimento analisado neste tópico surge como uma alternativa para o modelo de loteamento praticado comercialmente para a população de baixa renda, visto que, as soluções alcançadas pelo algoritmo apresentam um resultado formal com padrões similares ao da favela. Esse tipo de simulação, se integrado à estratégia de customização em massa, poderia contribuir para alcançar um resultado de qualidade espacial que vai além das UHs de forma individualizada.

A previsão da construção e expansão das residências, mesmo sendo considerada a partir de uma lógica de construção modular, resulta em uma ocupação bem orgânica, sem soluções repetitivas e monótonas, possibilitando uma maior identificação formal (ROMANO e TONOLI,

2012). Isso mostra que a industrialização da construção por meio de sistemas construtivos pré-fabricados não está necessariamente associada à padronização das residências.

É relevante explorar de que outras formas o uso do algoritmo poderia contribuir para soluções que vão além da oferta de um maior número de opções de projeto. A previsão das diversas possibilidades existentes – apesar de ser limitada por regras específicas dos *algoritmos* – pode servir como referência para a ocupação do assentamento, de acordo com a necessidade dinâmica de crescimento de cada família. A antecipação das possibilidades é uma forma de projetar pensando na flexibilidade contínua, visto que, a ideia é que as eventuais ampliações e adaptações sejam realizadas pelos próprios moradores utilizando de componentes estruturais pré-fabricados e materiais de acabamento da escolha de cada um.

### **5.3 Definição de arranjos espaciais com o auxílio de *algoritmos* associados à gramática da forma**

Utilizando o método da Gramática da Forma, é possível identificar as regras formais que organizam um espaço pré-existente e transformá-las nas variáveis de um algoritmo capaz de reproduzir este local de forma customizada ou de projetar a sua eventual expansão mantendo-se o padrão generativo (DUARTE, 2006).

#### *5.3.1 Identification of applicable patterns to algorithmization in BIM to explore solutions in the design stage of Social Housing*

O principal objetivo desse estudo exploratório é a identificação, descrição gráfica e matemática dos *algoritmos* que permeiam os *patterns*<sup>6</sup> que futuramente serão aplicados nos *sistemas generativos* através da utilização de ambientes BIM de programação visual para modelagem na criação.

Brigitte e Ruschel (2018) buscaram responder o seguinte questionamento: em que medida os *patterns* podem contribuir na elaboração de *algoritmos*? “A hipótese considera que os *patterns* são aplicáveis na construção de *algoritmos* por possuírem recomendações explícitas, geométricas ou informacionais” (BRÍGITTE e RUSCHEL, 2018, p.2) que buscam solucionar problemas arquitetônicos recorrentes em projetos.

---

<sup>6</sup> Os *patterns* são padrões desenvolvidos pelo arquiteto peruano Christopher Alexander que demonstram possíveis soluções de projeto baseadas na percepção do ambiente construído a por meio de proposições do tipo “se > então”, ou seja, cada *pattern* descreve um problema arquitetônico recorrente (se) e (então) apresenta condições para solucioná-lo, seguidas de um croqui esquemático (MENDES e BEIRÃ, 2014)

No experimento em questão os autores investigaram uma seleção de 74 *patterns* relacionados ao tema da habitação, e esses 74 *patterns* foram organizados em dois grupos segundo critérios metodológicos relacionados como eles podem apoiar no processo projetual sendo um grupo intitulado senso de urbanidade com 37 *patterns* e o outro senso de habitabilidade com 45 *patterns*.

Dentre os *patterns* pré-selecionados foram avaliados quais poderiam ser parametrizáveis para então ser desenvolvida uma proposta algoritmização dos mesmos como exemplificado na **Figura 21** que representa o fluxo proposto para o algoritmo Grau de intimidade, cuja função é determinar o arranjo dos ambientes da UH “de modo a criar sequência que comece pelas partes mais públicas e se encaminhe para áreas um pouco mais privadas, finalizando com os domínios mais íntimos” (BRÍGITE e RUSCHEL, 2018, p.4). O algoritmo é descrito por:

$$GrIt(UH) \Rightarrow Sl \rightarrow (Cz \wedge As) \vee Bh \rightarrow Qt$$

Onde: GrIt= Gradiente de intimidade; UH = Unidade habitacional; Sl= Sala; Cz= Cozinha; As = Área de Serviço; Bh= Banheiro; Qt= Quarto.

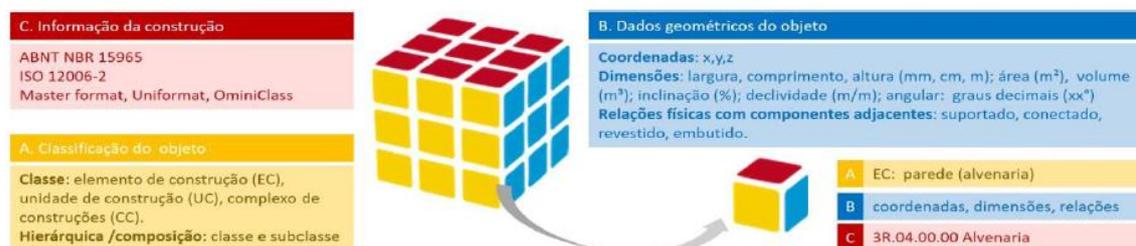
**Figura 21** – Representação esquemática do algoritmo grau de intimidade



Fonte: Brígite e Ruschel, 2018

Para adaptar os *algoritmos* para o conceito BIM foi pensado um método de classificação das informações que consiste na classificação do objeto, nos dados geométricos do objeto e na informação da construção conforme ilustrado na **Figura 22**.

**Figura 22** – atributos do modelo BIM.



Fonte: Brígite e Ruschel, 2018

Esse experimento é relevante pois demonstra a criação de *algoritmos* visando solucionar problemas arquitetônicos recorrentes com uma preocupação em atender aos critérios qualitativos que parte das relações do ser humano com o ambiente. Segundo os autores é comum observarmos a criação de *algoritmos* relacionados ao desempenho quantitativo (acústico, térmico, luminoso) mas há uma carência de *algoritmos* voltados para solucionar problemas com critérios qualitativos, (BRÍGITTE e RUSCHEL,2018).

Dessa forma, os autores enxergaram nos *patterns* uma capacidade de auxiliar na construção de *algoritmos* capazes de explorar soluções de projeto focadas na relação ser humano-ambiente. E o raciocínio utilizado para desenvolver os algoritmos pode ser aplicado em diversos contextos, inclusive o da HIS, usando como referência as informações coletadas diretamente com os usuários ou estudos pós ocupação para saber quais *patterns* são relevantes.

Em um processo de customização em massa, a transformação dos *patterns* em *algoritmos* poderia contribuir para explorar novas soluções na concepção de projetos que ultrapassem os critérios quantitativos.

### 5.3.2 Digital Morphogenesis: A Computational Housing Typology

No trabalho *Digital Morphogenesis* é apresentado um método de projeto paramétrico usados para desenvolver projetos de habitações com base em critérios específicos do local como: programa, terreno, condições climáticas, sistema construtivo, entre outros. Esse método foi desenvolvido pensando em um contexto similar ao do tópico 5.2.1 que consiste na produção de habitações nos Estados Unidos.

O mercado atual de construção de casas nesse contexto é liderado por incorporadores que resumem a customização da arquitetura a uma lista de acabamentos internos que um

comprador do imóvel pode escolher. Como resultado, os bairros são constituídos por apenas quatro ou cinco plantas baixas diferentes. Segundo o autor, os arquitetos representam atualmente uma parcela insignificante da indústria de arquitetura residencial (WILLIS, 2012).

Para tentar solucionar essa questão o autor propôs a criação de um modelo paramétrico que poderia ser aplicado para desenvolver projetos residenciais em massa de forma customizada. Para criar o modelo paramétrico o autor estudou diversos estilos de residências de várias cidades dos Estados Unidos considerando planta baixa, mobiliário mínimo, fachada, sistema construtivo e componentes da construção. Ele utilizou essas informações para criar um modelo de gramática da forma para cada um desses estilos, sendo capaz de produzir residências diversas que compartilhassem de algumas características específicas.

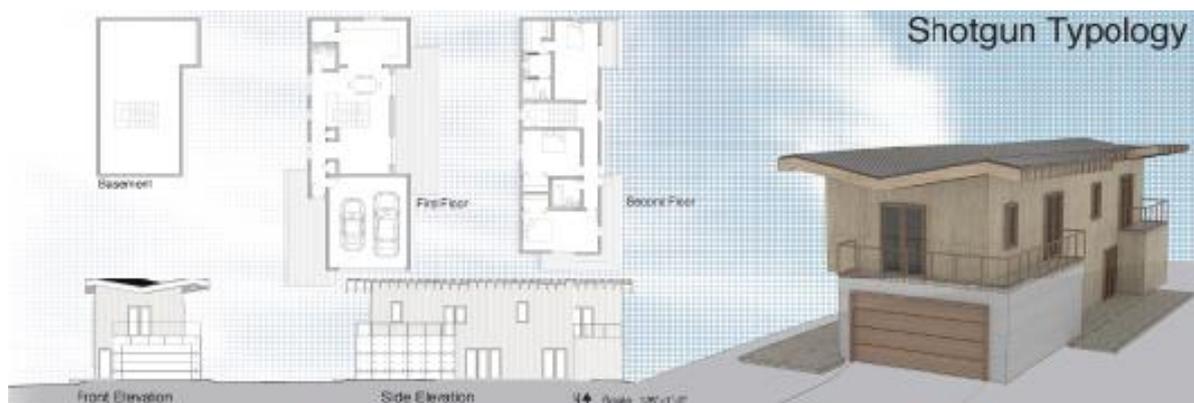
O *software* utilizado foi o *Rhinceros* com o auxílio do *plug in* de programação visual *Grasshopper* e as plantas foram geradas utilizando o *plug in* *Galapagos*, um solucionador evolucionário. Ao fazer o script parametricamente, permite-se que o usuário possa alterar valores e decisões que funcionam dentro da gramática para produzir uma série de diferentes residências (WILLIS, 2012).

O grande potencial desse experimento é que além da geração das diversas opções de planta baixa o resultado final conta com a solução da implantação da edificação no terreno, com a compatibilização com o sistema construtivo (**Figura 23**) e também com a documentação do projeto contendo plantas, elevações e imagens renderizadas do modelo 3D como podemos ver na **Figura 24**. Essas funcionalidades poderiam potencializar o fluxo da customização em massa.

**Figura 23** – Compatibilização entre plantas e sistema construtivo



Fonte: Willis, 2012

**Figura 24** – Exemplo de documentação do projeto

Fonte: Willis, 2012

Esse projeto não foi pensado para o contexto da HIS brasileira, entretanto, as questões que motivaram o desenvolvimento do experimento são muito similares às questões que foram discutidas anteriormente neste trabalho: a repetição de UH padronizadas e falta de participação dos usuários nas decisões de projeto. Além disso considera-se o uso de sistemas construtivos industrializados e como o projeto é completamente parametrizado ele pode ser adaptado a outras realidades.

Apesar do grande potencial alcançado com esse experimento, o próprio autor destaca que esses métodos não são amplamente acessíveis, nem para os arquitetos, tampouco para o público geral. Seria necessário então trabalhar numa forma de tornar a interface de interação com o projeto mais simplificada e intuitiva a fim de permitir que o usuário final tenha participação efetiva.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo geral desse trabalho foi analisar a aplicabilidade de sistemas generativos no processo de projeto no contexto da produção de HIS em larga escala visando a customização em massa. O desenvolvimento dessa pesquisa demonstrou que a implementação de *algoritmos evolutivos* com esse objetivo é possível e pode contribuir para agilizar e potencializar o processo de desenvolvimento de projetos. Essa estratégia é uma oportunidade potencial visto que ainda há muito a ser explorado.

A revisão de conteúdo relacionada aos *sistemas generativos* e CM possibilitou que entendêssemos os passos que constituem cada uma dessas estratégias de projeto. Conhecendo esses passos e os conceitos relacionados a eles foi possível identificar oportunidades e apreender formas de combiná-los para alcançar resultados positivos no cenário da produção de HIS

Tendo em vista as fases que constituem o fluxo estratégico da CM identificamos que os *algoritmos* podem ser inseridos para promover a automação de duas etapas: geração de alternativas e avaliação das alternativas. E como vimos no tópico 5.3 os *algoritmos evolutivos* associados à *modelagem paramétrica* podem ser utilizados para a criação de sistemas construtivos, criação de plantas baixas, volumetria e implantação das UHs no terreno.

É esperado que a utilização desses métodos em conjunto possibilite alcançar diversas opções de projeto potenciais a partir de critérios mínimos pré-estabelecidos e que os resultados atendam esses critérios simultaneamente de forma eficiente e equilibrada, sem priorizar um ou outro. Espera-se também que esses resultados sejam atingidos de forma rápida, otimizando um fator importante nesse tipo de empreendimento que reside na relação tempo x custo.

Os dados coletados apontam que a CM é viável nesse contexto. As modificações realizadas e pretendidas – que na maior parte demonstram a necessidade de diferentes possibilidades de *layout* e cômodos com dimensões maiores – poderiam ser evitadas se tivessem sido contempladas durante o processo de desenvolvimento das UHs por meio da CM e participação dos usuários. Outra oportunidade observada é a adoção dos sistemas estrutural e construtivos e pré-fabricados como uma forma de viabilizar a CM das UHs com a produção em larga escala e baixo custo além de proporcionar redução no tempo de obra.

O principal desafio é como envolver de forma efetiva o cliente no processo de desenvolvimento do projeto. Essa é uma questão muito importante para garantir que o produto final realmente esteja de acordo com as necessidades dos usuários. Na produção em massa, principalmente no contexto da habitação social, o contato direto do arquiteto com os futuros moradores não é priorizado, portanto é necessário criar estratégias para diminuir essa distância.

A revisão de conteúdo relacionado à produção de moradia social em massa permitiu que pudéssemos identificar as principais características e requisitos não atendidos pelas residências, características que são de certa forma problemáticas quando se trata de moradias sociais. Por isso, acredita-se que a partir do estudo pós ocupação de empreendimentos similares ao projeto que se pretende desenvolver seja possível compreender melhor as características que são intrínsecas no *design* de um contexto socioeconômico específico, e que essas informações possam proporcionar a geração de projetos de melhor qualidade, evitando soluções que não funcionam bem para o perfil em questão.

No caso específico da aplicação de *algoritmos evolutivos* para viabilizar a CM, uma sugestão para trabalhos futuros seria no primeiro momento utilizar dados de estudo pós ocupação como referência para a criação do *modelo paramétrico* e critérios de qualidade a serem usados pelos operadores de avaliação e seleção nos *algoritmos evolutivos*.

No segundo momento, para dar oportunidade do usuário participar nos processos decisórios uma possibilidade seria o desenvolvimento de interfaces interativas simplificadas por meio das quais o usuário possa interagir com o auxílio do arquiteto para definir questões como o programa, relação de adjacência entre os cômodos, sistema construtivo, e outras diversas particularidades que cada projeto possui. Dessa forma, no fim do processo, o usuário poderia visualizar as representações bi e tridimensional das soluções potenciais e escolher entre um leque de possibilidades o projeto que o atende melhor.

Ainda relacionado ao contato mais próximo com os usuários é necessário pensar de forma cuidadosa a representação dessas possíveis opções de projeto. Sabe-se que muitas vezes a representação técnica com plantas, cortes e maquetes 3D que os arquitetos estão acostumados não são compreensíveis para pessoas leigas. Por isso, a representação gráfica deve garantir que as propostas sejam compreensíveis para os futuros moradores, dessa forma eles poderiam interferir e contribuir de forma efetiva no processo.

Esse contato mais próximo com os usuários é importante para garantir uma maior satisfação dos usuários com sua casa própria e por consequência garantir maior bem-estar e minimizar o dispêndio de recursos financeiros com reformas adaptações nas residências.

Apesar do potencial existente nesse fluxo de trabalho a revisão de conteúdo mostrou que também existem barreiras que dificultam a utilização dos *algoritmos* no desenvolvimento de projetos arquitetônicos. Vimos que a adoção de um processo de projeto embasado na *parametrização* e no uso de *algoritmos* exige o uso da lógica computacional e da linguagem de programação além de conhecimento sobre conceitos relacionados à teoria evolucionista.

Os *softwares* de programação visual que temos disponíveis atualmente de certa forma democratizam o uso da programação por projetistas. Se comparados com a programação por meio de linhas de código textual são muito mais simples e intuitivos, com uma curva de aprendizado mais suave. Entretanto, esse ainda é um tipo de conteúdo é pouco desenvolvido na realidade brasileira e ainda não está inserido na formação dos arquitetos e urbanistas.

Apesar do conteúdo teórico relacionado aos conceitos que envolvem os *sistemas generativos* e sua aplicação sejam consistentes e estejam amplamente disponíveis em várias bases de pesquisa, percebe-se uma carência relacionada a trabalhos voltados especificamente para o uso dos *softwares* e seus recursos aplicados ao desenvolvimento de projetos arquitetônicos num grau de complexidade que vai além de gerar a volumetria da edificação. Cursos, tutoriais e artigos voltados para o ensino dos softwares para o desenvolvimento de projetos como os apresentados no capítulo 5 ou até mesmo a divulgação de projetos no formato *open source*, são tipos de conteúdo muito escassos.

Como vimos, as informações obtidas na pesquisa indicam que há barreiras e oportunidades para o uso dos *algoritmos evolutivos* visando a customização em massa nas habitações de interesse social. Mas, por fim, acredita-se que a combinação da estratégia de CM e algorítmica considerando uma interface que possibilite a interação dos usuários é uma abordagem relevante e capaz de atingir bons resultados. Esse trabalho apresenta-se como uma pesquisa exploratória baseada em revisão bibliográfica, mas por ter uma abordagem pautada em problemas e demandas reais, avalia-se que seja possível que seus resultados contribuam em certo grau com esse tipo de problema, que não se detém ao espectro arquitetônico, mas também social.

## REFERÊNCIAS

ABRISHAMI, Sepehr. *et al.* **Integration of BIM and generative design to exploit AEC conceptual design innovation.** *Journal of Information Technology in Construction (ITcon)* v. 19, 2014. P. 350-359. Disponível em: <http://www.itcon.org/2014/21>. Acesso em: 25 de ago 2020.

AMORIM, Cláudia. *et al.* Qualidade do projeto arquitetônico. In: BLUMENSCHHEIN, R. N.; PEIXOTO, E; GUINANCIO, C. (Org). **Avaliação da qualidade da habitação de interesse social: projetos urbanístico e arquitetônico e qualidade construtiva.** Brasília: UnB, FAU, 2015. p. 102–139. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/277708754\\_Avaliacao\\_da\\_qualidade\\_da\\_habitacao\\_de\\_interesse\\_social\\_projetos\\_urbanistico\\_e\\_arquitetonico\\_e\\_qualidade\\_construtiva](https://www.researchgate.net/publication/277708754_Avaliacao_da_qualidade_da_habitacao_de_interesse_social_projetos_urbanistico_e_arquitetonico_e_qualidade_construtiva). Acesso em: 23 nov. 2020

AUTODESK. **Sobre os relacionamentos da modelagem paramétrica.** 2019. Disponível em: <https://knowledge.autodesk.com/pt-br/support/revit-products/getting-started/caas/CloudHelp/cloudhelp/2018/PTB/Revit-GetStarted/files/GUID-71F2C8EE-2A90-4076-A6C7-702082566DDF-htm.html#:~:text=A%20modelagem%20param%C3%A9trica%20refere%2Dse,quanto%20por%20voc%C3%AA%20enquanto%20trabalha.&text=Portanto%2C%20a%20opera%C3%A7%C3%A3o%20do%20software%20%C3%A9%20param%C3%A9trica>. Acesso em: 8 set. 2020.

BIANCA, Ricardo. **Do Projeto Paramétrico ao Projeto Generativo: Parte1 - O que é projeto generativo.** Blog Oficial sobre AEC da Autodesk Brasil, 2017. Disponível em: <https://blogs.autodesk.com/mundoaec/projeto-generativo-parte-1/>. Acesso em: 8 set. 2020.

BRANDÃO, Douglas. Disposições técnicas e diretrizes para projeto de habitações sociais evolutivas. **Ambient. constr. (Online)**, Porto Alegre, v.11, n.2, p. 73-96, 2011. Disponível em: [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1678-86212011000200006&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1678-86212011000200006&lng=en&nrm=iso). Acesso em : 30 Out. 2020.

CAIXA. **Programa minha casa minha vida entidades recursos FDS.** 20- Disponível em: [https://www.caixa.gov.br/Downloads/habitacao-minha-casa-minha-vida/MANUAL\\_MCMV\\_ENTIDADES.pdf](https://www.caixa.gov.br/Downloads/habitacao-minha-casa-minha-vida/MANUAL_MCMV_ENTIDADES.pdf) Acesso em 13 nov. 2020

CAU/BR. **Pesquisa CAU/BR datafolha.** 2015. Disponível em <https://www.caubr.gov.br/pesquisa2015/> Acesso em: 30 set. 2020

CRUZ, Renato. **Design generativo como ferramenta e metodologia projetual na construção metálica.** 2018. Disponível em: <http://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/10640>. Acesso em: 20 ago. 2020.

CELANI, Gabriela. **Algorithmic Sustainable Design: Uma visão crítica do projeto generativo.** Disponível em: <https://www.vitruvius.com.br/revistas/read/resenhasonline/10.116/3995> Acesso em 25 ago. 2020.

CELANI, Gabriela *et al.* **Sistemas generativos de projeto**: Classificação e reflexão sob o ponto de vista da representação e dos meios de produção. *Revista Brasileira de Expressão Gráfica*, Vol 1, 2013. Disponível em: <http://rbeg.net/artigos/artigo2.pdf>. Acesso em: 20 mar. 2021.

CONSTANTINOU, Eliane; BETTIO MACHADO, Letícia. Reflexões sobre a habitação social contemporânea: uma proposta metodológica. **Risco**, [s. l.], v. 17, n. 1, p. 64-82, 21 nov. 2020. DOI <https://doi.org/10.11606/issn.1984-4506.v17i1p64-82>. Disponível em: <https://www.revistas.usp.br/risco/article/view/145620/154282>. Acesso em: 29 out. 2020.

BOLFE, Sandra; RUBIN, Graziela; O desenvolvimento da habitação social no Brasil. **Ciência e Natura**, Santa Maria, v. 36, n. 2, p. 201-213, 2014. DOI 10.5902/2179460X11637. Disponível em: <https://periodicos.ufsm.br/cienciaenatura/article/viewFile/11637/pdf>. Acesso em: 27 out. 2020.

FAGUNDES, Cristian. **Sistema generativo como ferramenta de otimização no processo exploratório do design de produto**. 2019. 118 f. Dissertação (Mestrado em *Design*) – Escola de Engenharia / Faculdade de Arquitetura, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/204634>. Acesso em: 15 mar. 2021

LAMOUNIER, Rosamônica. **Da autoconstrução a arquitetura aberta**: O open building no Brasil. Belo Horizonte, 2017. Disponível em: <http://praxis.arq.ufmg.br/textos/tese-rosa.pdf>. Acesso em: 14 set. 2020.

LOGSDON, Louise *et al.* **Flexibilidade na habitação social**: a prática e a teoria em busca da qualidade espacial. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE QUALIDADE DO PROJETO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 6., 2019, Uberlândia. **Anais...** Uberlândia: PPGAU/FAUeD/UFU, 2019b. p. 1550-1560. Disponível em: <https://doi.org/10.14393/sbqp19139>. Acesso em: 7 abr. 2021.

MAYER, Rosirene. **A gramática da habitação mínima: Análise do projeto arquitetônico da Habitação de Interesse Social em Porto Alegre e Região Metropolitana**. Porto Alegre, 2012. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/67057/000872093.pdf;jsessionid=29525FA9E952F5B69176F39FDB2AD1E7?sequence=1>. Acesso em: 14 set. 2020.

MARTINO, Jarryer Andrade de. **Algoritmos evolutivos como método para desenvolvimento de projetos de arquitetura**. 2015. Tese (doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Campinas, SP. Disponível em: <http://www.repositorio.unicamp.br/handle/REPOSIP/258033>. Acesso em: 21 ago. 2020.

MICHAEL, Bergin; KYLE, Steinfeld. Housing agency system (has): multi-criteria satisficing & mass-customization of homes. **ACSA Fall Conference**, Berkeley, Califórnia, p. 93-93, 2012. Disponível em: <https://www.acsa.org/proceedings/Fall%20Conference%20Proceedings/ACSA.FALL.12/ACSA.FALL.12.16.pdf>. Acesso em: 19 mar. 2021.

MITCHELL, Melanie. **An Introduction to Genetic Algorithms**. 5. ed. Londres: A Bradford Book The MIT Press, 1999. 158 p. ISBN 0-262-13316-4. Disponível em: <https://www.boente.eti.br/fuzzy/ebook-fuzzy-mitchell.pdf>. Acesso em: 21 ago. 2020.

- NAGY, Danil. **Learning from nature**. 2017. Disponível em: <<https://medium.com/generative-design/learning-from-nature-fe5b7290e3de>> Acesso em: 20 ago. 2020.
- NASCIMENTO, Denise *et al.* **Programa Minha Casa Minha Vida: Desafios e avanços na Região Metropolitana de Belo Horizonte**. In SANTO AMORE, C; SHIMBO, L. Z.; RUFINO M. B. C. (orgs.) *Minha Casa... e a cidade?* Rio de Janeiro: Letra Capital, 2015. Disponível em: <https://praxis.arq.ufmg.br/textos/mcmv-capa.pdf>. Acesso em: 03 abr. 2021.
- NOGUCHI, M. A Proposed Choice Model for the Delivery of Mass Custom Homes. In: INTERNATIONAL HOUSING RESEARCH CONFERENCE, Toronto, 2004. **Proceedings...** Toronto: CUCS, 2004. Disponível em: [http://www.urbancenter.utoronto.ca/pdfs/housingconference/Noguchi\\_Proposed\\_Choice\\_Mod.pdf](http://www.urbancenter.utoronto.ca/pdfs/housingconference/Noguchi_Proposed_Choice_Mod.pdf) Acesso em: 07 abr. 2021.
- PALHARES, Sérgio Ricardo. **Variantes de modificação em habitação popular: Do espaço planejado ao espaço vivido**. Belo Horizonte, 2001. Disponível em: [http://www.mom.arq.ufmg.br/mom/01\\_dissertacoes/palhares.pdf](http://www.mom.arq.ufmg.br/mom/01_dissertacoes/palhares.pdf). Acesso em: 14 set. 2020.
- PEREIRA, G. M. **Funcionalidade e qualidade dimensional na habitação: Contribuição à NBR 15.575/2013**. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/156883>. Acesso em: 23 nov. 2020
- PRAXIS-EAUFMG 2014. **Minha Casa, Minha Vida: Estudos Avaliativos na RMBH**. Belo Horizonte: Escola de Arquitetura Universidade Federal de Minas Gerais (EAUFMG). Disponível em: <http://www.praxis.arq.ufmg.br/textos/cnpq-mcmv.pdf> . Acesso em: 29 out. 2020
- PUPO, R. T. Ensino da prototipagem rápida e fabricação digital para arquitetura e construção no Brasil: definições e estado da arte. **PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção**, Campinas, SP, v. 1, n. 3, p. 80–98, 2008. DOI: 10.20396/parc.v1i3.8634511. Disponível em: <https://periodicos.sbu.unicamp.br/ojs/index.php/parc/article/view/8634511>. Acesso em: 26 mar. 2021.
- ROMANO, Elisabetta; TONOLI, Giancarlo. Projeto de Habitações de Interesse Social segundo uma abordagem generativa. **SIGraDi 2012**, Fortaleza, p. 593-597, 2012. Disponível em: [http://papers.cumincad.org/cgi-bin/works/paper/sigradi2012\\_323](http://papers.cumincad.org/cgi-bin/works/paper/sigradi2012_323). Acesso em: 19 mar. 2021
- SANTIAGO, Alexandre *et al.* Light steel framing como alternativa para a construção de moradias populares. **CONSTRUMETAL – CONGRESSO LATINO-AMERICANO DA CONSTRUÇÃO METÁLICA**, São Paulo, ago 2010. Disponível em: <https://www.abcem.org.br/construmetal/2010/downloads/contribuicoes-tecnicas/23-light-steel-framing-como-alternativa-para-a-construcao-de-moradias-populares.pdf>. Acesso em: 7 abr. 2021.
- SANCHES, Leonardo *et al.* **As pesquisas sobre sistemas generativos: uma revisão sistemática de literatura**. **PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção**, Campinas, SP, v. 9, n. 2, p. 133-151, 2018. ISSN 1980-6809. Disponível em: <https://doi.org/10.20396/parc.v9i2.8650200>. Acesso em: 25 ago 2020.

SHEA, Kristina *et al.* Towards integrated performance-driven generative *design* tools. **Automation in Construction**, v. 14, n. 2, 2005. p. 253–264. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2004.07.002>. Acesso em: 25 ago. 2020.

TAUBE, Jaqueline.; HIROTA, Ercília. **Customização em massa no processo de provisão de Habitações de Interesse Social**: um estudo de caso. *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v. 17, n. 4, p. 253-268, out./dez. 2017. ISSN 1678-8621 Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212017000400196>

TEIXEIRA, Maria Cristina. **Espaço projetado e espaço vivido na habitação social**: os conjuntos Goiânia e Araguaia em Belo Horizonte. 2004. Disponível em: [https://issuu.com/urbel/docs/espaco\\_projetado\\_espac\\_vivido\\_na\\_habit\\_social](https://issuu.com/urbel/docs/espaco_projetado_espac_vivido_na_habit_social). Acesso em: 29 out. 2020.

União nacional por moradia popular (UNMP). Empreendimentos da união nacional por moradia popular no programa minha casa minha vida - entidades. **Revista da produção de habitação em autogestão**, p. 1-179, 20-. Disponível em: [https://autogestao.unmp.org.br/wp-content/uploads/2019/09/revista\\_autogestao.pdf](https://autogestao.unmp.org.br/wp-content/uploads/2019/09/revista_autogestao.pdf). Acesso em: 13 nov. 2020.