

ALEXANDER LOPES DE AQUINO BRASIL

**CUSTOMIZAÇÃO EM MASSA DE HABITAÇÃO UNIFAMILIAR HORIZONTAL DE
PEQUENO PORTE A PARTIR DA INTEROPERABILIDADE ENTRE O BIM E A
MODELAGEM ALGORÍMITICA-PARAMÉTRICA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, para obtenção do título *Magister Scientiae*.

Orientadora: Andressa Carmo Pena Martinez

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2022**

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

B823c
2022
Brasil, Alexander Lopes de Aquino, 1990-
Customização em massa de habitação unifamiliar horizontal
de pequeno porte a partir da interoperabilidade entre o BIM e a
modelagem algorítmica-paramétrica / Alexander Lopes de
Aquino Brasil. – Viçosa, MG, 2022.
1 dissertação eletrônica (153 f.): il. (algumas color.).

Inclui apêndices.

Orientador: Andressa Carmo Pena Martinez.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa,
Departamento de Arquitetura e Urbanismo, 2022.

Referências bibliográficas: f. 129-136.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2022.414>

Modo de acesso: World Wide Web.

1. Arquitetura de habitação. 2. Modelagem de informação
de construção. 3. Habitações - Projetos e construção - Modelos
matemáticos. I. Martinez, Andressa Carmo Pena, 1982-.
II. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de
Arquitetura e Urbanismo. Programa de Pós-Graduação em
Arquitetura e Urbanismo. III. Título.

CDD 22. ed. 728

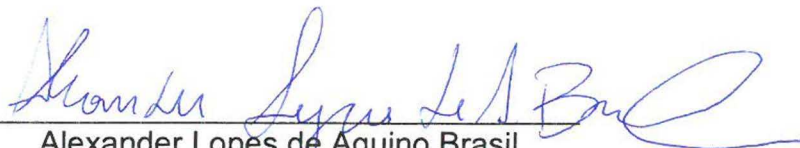
ALEXANDER LOPES DE AQUINO BRASIL

**CUSTOMIZAÇÃO EM MASSA DE HABITAÇÃO UNIFAMILIAR HORIZONTAL DE
PEQUENO PORTE A PARTIR DA INTEROPERABILIDADE ENTRE O BIM E A
MODELAGEM ALGORÍMITICA-PARAMÉTRICA**

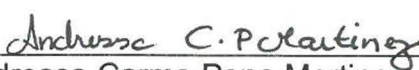
Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, para obtenção do título *Magister Scientiae*.

APROVADA: 02 de maio de 2022

Assentimento:



Alexander Lopes de Aquino Brasil
Autor



Andressa Carmo Pena Martinez
Orientadora

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal de Viçosa pelo acolhimento e apoio.

À minha orientadora Andressa por toda a dedicação em me guiar neste trabalho, paciência e conhecimento transmitido.

Aos meus pais Tânia e Alex pelo apoio incondicional aos meus sonhos e objetivos e por acreditarem em mim.

À Danielle por estar ao meu lado durante essa jornada, pelo companheirismo, paciência e apoio aos meus sonhos e objetivos.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

RESUMO

BRASIL, Alexander Lopes de Aquino, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, maio de 2022. **Customização em massa de habitação unifamiliar horizontal de pequeno porte a partir da interoperabilidade entre o BIM e a modelagem algorítmica-paramétrica.** Orientadora: Andressa Carmo Pena Martinez.

Atualmente, a alta demanda de unidades habitacionais de interesse social, baseia-se amplamente em uma estratégia de padronização de soluções projetuais e de processos construtivos para redução do custo total de execução. Como alternativa, a customização em massa vem sendo estudada como estratégia para o setor habitacional nos últimos 25 anos. Dado este cenário, este trabalho parte da premissa que a verificação dos dados da construção em tempo real pode ser uma variável adicional para as decisões projetuais em direção a um processo de customização e produção futuro. Logo, parte-se da premissa inicial de que o *Building Information Modeling* (BIM) em conjunto com a modelagem algorítmico-paramétrica são tecnologias com potencial para auxiliar em processos de customização em massa de habitações de interesse social, por oferecerem controle em tempo real das variáveis de projeto e dos seus respectivos dados, nas etapas de projeto. Assim, a partir de métodos experimentais, de simulação e de comparação, essa pesquisa apresenta como resultado, um sistema de projetos voltado para a produção customizada em massa de unidades habitacionais que podem variar de aproximadamente 45m² até 120m², aplicado ao contexto específico de Teresina, no Piauí. Espera-se que a sistematização dos processos de desenvolvimento da plataforma possa colaborar com aplicações futuras e posteriores desenvolvimentos do tema.

Palavras-chave: Customização em massa. Habitação de interesse social. BIM. Modelagem algorítmico-paramétrica

ABSTRACT

BRASIL, Alexander Lopes de Aquino, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, May, 2022. **Mass customization of small horizontal single-family housing through the interoperability between BIM and algorithmic-parametric modeling.** Adviser: Andressa Carmo Pena Martinez.

Currently, the high housing demand is primarily based on the standardization of design and production to reduce the total execution cost of the units. Alternatively, mass customization has been studied as a strategy for the housing sector in the last three decades. Given this scenario, this work is based on the premise that real-time verification of the construction data can be an additional variable for the design decisions toward a customization production process. Therefore, this work is based on the initial *hypothesis that Building Information Modeling (BIM) and algorithmic-parametric modeling are technologies that can aid the mass customization processes of social housing since they offer real-time control of design variables and their associated data in the design stages.* Thus, from experimental, simulation, and comparison methods, this research presents, as a result, a design system focused on the mass customization of housing units that can vary from approximately 45m² to 120m², applied to the specific context of Teresina, in Piauí. The systematization of the platform's development processes is expected to collaborate with future applications and later developments of the theme.

Keywords: Mass customization. Social housing. BIM. Algorithmic-parametric modeling

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|--|----|
| Figura 1: Cadeia de valores tradicional de Porter com destaque (em cinza) da fase de operações, único ponto em que a customização poderia ocorrer. Fonte: (KAPLAN e HAENLEIN, 2006). | 24 |
| Figura 2: Representação esquemática da comparação das capacidades para a customização em massa (HART, 1995; ZIPKIN, 2001; SALVADOR, HOLAN e PILLER, 2009; DUARTE, 2019), com os subsistemas identificados e com os termos utilizados por Pine II, Victor e Boynton (1993)..... | 27 |
| Figura 3: Quadro de legendas da análise diagramática. Fonte: Autor. | 29 |
| Figura 4: Exemplos de subsistemas de elicitação. De cima para baixo: interativo via plataforma eletrônica; convencional via formulário. Fonte: Autor. | 30 |
| Figura 5: Exemplo de um subsistema de design paramétrico. Fonte: Autor. | 33 |
| Figura 6: Exemplo de um subsistema de design baseado em desempenho. Fonte: Autor..... | 33 |
| Figura 7: Exemplo de um subsistema de design composto para interação direto com o usuário. Fonte: Autor..... | 34 |
| Figura 8: Exemplos de subsistemas de produção. De cima para baixo: tradicional artesanal diretamente no canteiro de obras; industrial pré-fabricado com montagem na obra; produção automatizada a partir da manufatura aditiva diretamente no canteiro de obras. Fonte: Autor..... | 36 |
| Figura 9: Exemplo de subsistema de produção com fase de submontagem de componentes anterior a montagem final. Fonte: Autor..... | 36 |
| Figura 10: Exemplo do subsistema de logística na configuração de um sistema de edifícios com ponto de envolvimento do usuário na fase de montagem. Fonte: Autor. | 38 |
| Figura 11: Exemplo do subsistema de logística na configuração de um sistema de CM com produção automatizada sob medida conforme requerimentos do usuário final. Fonte: Autor..... | 38 |
| Figura 12: Exemplo subsistema de logística na configuração de um sistema de edifícios padronizados a partir da lógica especulativa com ponto de envolvimento do usuário ao final da produção. Fonte: Autor. | 39 |
| Figura 13: Exemplo de um subsistema de logística cuja produção ocorre com base em um catálogo pré-estabelecido. | 39 |
| Figura 14: Representação diagramática de um sistema para produção customizada em massa de um produto genérico. | 40 |

| | |
|---|----|
| Figura 15: Grafo representando o subsistema de design desenvolvido pela pesquisa. Fonte: Autor..... | 62 |
| Figura 16: Diagrama de integração entre os diversos programas e plugins envolvidos no processo de customização em massa do presente trabalho. Fonte: Autor. | 65 |
| Figura 17: Unidades residenciais do Residencial Parque Brasil. Fonte: (PREFEITURA MUNICIPAL DE TERESINA, 2019b)..... | 68 |
| Figura 18: Mapa de implantação do loteamento Parque Brasil. Fonte: (PREFEITURA MUNICIPAL DE TERESINA, 2019a)..... | 68 |
| Figura 19: Aspectos Habitacionais – Área de intervenção do Programa Lagoas do Norte. Fonte: (PREFEITURA MUNICIPAL DE TERESINA, 2019a) | 70 |
| Figura 20: Aspectos Habitacionais – Área de intervenção do Programa Lagoas do Norte. Fonte: (PREFEITURA MUNICIPAL DE TERESINA, 2019a). | 71 |
| Figura 21: Fachada de parte das residências afetadas pelo Programa Lagoas dos Norte. Fonte: Autor a partir do site Google Maps. | 72 |
| Figura 22: Combinação dos módulos para gerar variedade de volumetrias. Adaptado de Noguchi et al. (2016). Fonte: Autor. | 74 |
| Figura 23: Variedade de um mesmo volume a partir da manipulação de um elemento externo. Adaptado de Noguchi et al. (2016). Fonte: Autor. | 74 |
| Figura 24: Outro nível de variedade concedido a uma mesma volumetria a partir da diferença de posicionamento das esquadrias. Fonte Autor..... | 74 |
| Figura 25: Nos projetos padronizados, a flexibilidade da habitação é padronizada. Fonte: Autor..... | 75 |
| Figura 26: No projeto customizado, a flexibilidade também é elemento passível de customização. Fonte: Autor..... | 75 |
| Figura 27: Simulação de evolução a longo prazo de uma das habitações desenvolvidas. Fonte: Autor..... | 76 |
| Figura 28: Exemplo de área externa coberta de uma das habitações sendo utilizada como uma área de refeições ao ar livre. Fonte: Autor..... | 76 |
| Figura 29: Exemplo de instância do universo de soluções possíveis gerado a partir do subsistema de design desenvolvido no presente trabalho e suas principais características construtivas. Fonte: Autor..... | 77 |
| Figura 30: Representação simbólica do sistema de geração de design desenvolvido pela pesquisa. Fonte: Autor..... | 80 |
| Figura 31: Apresentação do script. Fonte: Autor. | 81 |

| | |
|---|----|
| Figura 32: Apresentação da plataforma em funcionamento: a) modelo BIM atualizado em tempo real conforme manipulação no código; b) representação 2D e 3D da solução; c) interface de manipulação dos parâmetros e visualização das informações pertinentes ao projeto; d) ambiente de realidade virtual. Fonte: Autor..... | 82 |
| Figura 33: Resultados gerados utilizando a plataforma desenvolvida. A = área construída dos projetos em m ² ; C = estimativa de custo da construção, com base nas referências da SINAPI em reais. Fonte: Autor..... | 84 |
| Figura 34: Conexão entre o programa Revit e o ambiente de modelagem algoritmo paramétrico Grasshopper utilizando o plugin Rhino Inside Revit. Fonte: Autor..... | 85 |
| Figura 35: Modelagem de dados de uma parede de blocos cerâmicos. Fonte: Autor..... | 86 |
| Figura 36: Construção dos módulos e subdivisão da área molhada. Identificação dos módulos e dos eixos. Fonte: Autor..... | 87 |
| Figura 37: Rotina para cálculo para custo da execução das paredes. Fonte: Autor. | 87 |
| Figura 38: Representação das informações do modelo utilizando a <i>viewport</i> do programa Rhinoceros 3D. Fonte: Autor..... | 88 |
| Figura 39: Exibição simultânea do modelo central dentro do programa BIM à esquerda e modelo tridimensional dentro do programa Rhinoceros 3D. Fonte: Autor..... | 89 |
| Figura 40: Interface do usuário desenvolvida. Fonte: Autor..... | 90 |
| Figura 41: Construção dos módulos que formam a base compositiva das habitações a partir dos eixos guias. Fonte: Autor..... | 91 |
| Figura 42: Módulos que compõem a base compositiva das edificações e seus respectivos parâmetros dimensionais. Fonte: Autor..... | 91 |
| Figura 43: Integração entre os módulos. Fonte: Autor..... | 92 |
| Figura 44: Representação das regras de inclusão e exclusão dos módulos. Fonte: Autor..... | 93 |
| Figura 45: Representação de aplicação das regras dimensionais dos módulos. Fonte: Autor..... | 94 |
| Figura 46: Identificação dos vértices dos módulos. Fonte: Autor..... | 94 |
| Figura 47: Abertura de circulações externas entre os módulos a partir dos eixos guias. Fonte: Autor..... | 95 |
| Figura 48: Construção do banheiro e posicionamento do eixo hidráulico. Fonte: Autor..... | 96 |
| Figura 49: Regra de exclusão de módulos adjacentes ao eixo hidráulico para garantia de entrada e saída de ar. Fonte: Autor..... | 96 |

| | |
|--|-----|
| Figura 50: Composição do núcleo hidráulico com somente um módulo ou dois módulos. Fonte: Autor. | 97 |
| Figura 51: Posicionamento da área molhada adicional sendo guiado pelo eixo hidráulico. Fonte: Autor. | 98 |
| Figura 52: Diferentes tipos de posicionamento da área molhada adicional em relação ao banheiro. Fonte: Autor. | 98 |
| Figura 53: Representação da aplicação da regra descrita em a. Fonte: Autor. | 98 |
| Figura 54: Representação de aplicação da regra definida e b. Fonte: Autor. | 99 |
| Figura 55: Exemplo de posicionamento de uma área molhada na parte externa da edificação. Fonte: Autor. | 99 |
| Figura 56: Posicionamento da caixa d'água de acordo com a configuração do núcleo hidráulico. Fonte: Autor. | 99 |
| Figura 57: Subdivisão de um módulo para a alocar uma área molhada adicional. Fonte: Autor. | 100 |
| Figura 58: O núcleo hidráulico é composto pelos módulos A e C, no entanto, uma segunda área molhada adicional é posicionada em H. Fonte: Autor. | 101 |
| Figura 59: Representação da construção de uma circulação interna a partir do processo de subdivisão coordenado pelos eixos y e x. Fonte: Autor. | 101 |
| Figura 60: Representação esquemática das regras que definem a extensão da cobertura: A) ao menos um módulo que compõe o par está ativo; B) módulo ativo como estrutura; C) módulo ativo como área construída. Fonte: Autor. | 102 |
| Figura 61: Variedades de cobertura permitidas. Fonte: Autor. | 103 |
| Figura 62: Posicionamento de portas e janelas: Fonte: Autor. | 104 |
| Figura 63: Tabela com referência de custos de composição analítico. Fonte: (SISTEMA NACIONAL DE PESQUISA DE CUSTOS E ÍNDICES DA CONSTRUÇÃO CIVIL, 2021) | 110 |
| Figura 64: Representação esquemática mostrando de forma simplificada a criação dos módulos. Fonte: Autor. | 112 |
| Figura 65: Processo de subdivisão. Fonte: Autor. | 113 |
| Figura 66: Representação esquemática de um exemplo de exclusão de eixos sobrepostos. Fonte: Autor. | 113 |
| Figura 67: Organização e identificação dos eixos dos módulos. Fonte: Autor. | 114 |
| Figura 68: Referências para a construção do modelo central a partir dos módulos e eixos construídos pelo algoritmo. Fonte: Autor. | 115 |

Figura 69: Implementação dos componentes construtivos do modelo central com base nas referências definidas. Fonte: Autor..... 115

Figura 70 Resultados oriundos do exercício de controle de custos da pesquisa. A = área construída dos projetos em m²; C = estimativa de custo da construção, com base nas referências da SINAPI em reais. Fonte: Autor..... 118

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|-----|
| Tabela 1: Campo de atuação dos principais autores consultados. Fonte: Autores. ... | 20 |
| Tabela 2: Levantamento bibliográfico..... | 55 |
| Tabela 3: Definição dos parâmetros para geração das demandas. Fonte: Autor..... | 63 |
| Tabela 4: Representação do sistema de geração de demandas aleatórias com exemplo de resultados. Fonte: Autor..... | 64 |
| Tabela 5: Dados compilados do Residencial Parque Brasil. Fontes: (PREFEITURA MUNICIPAL DE TERESINA, 2019a; PREFEITURA MUNICIPAL DE TERESINA, 2019b) | 67 |
| Tabela 6: Dados compilados do perfil dos imóveis e famílias afetadas no poligonal da Rua Manoel Aguiar Filho antes da construção do projeto em 2020. Fonte: (PREFEITURA MUNICIPAL DE TERESINA, 2019a) | 69 |
| Tabela 7: Fatores de custo das etapas da obra. Fonte: (MATTOS, 2006)..... | 105 |
| Tabela 8: Levantamento de custos realizado com base no SINAPI para o Estado do PI. Data de referência: 14/05/2021. *Inclusão de insumos fora dos preços da SINAPI. | 106 |
| Tabela 9: Método para cálculo estimado do custo com base nos valores levantados a partir das referências do SINAPI. Fonte: Autor. | 108 |
| Tabela 10: Programa base para geração das habitações. Fonte: Autor. | 117 |

SUMÁRIO

| | |
|--|-----|
| 1 INTRODUÇÃO | 13 |
| 1.1 Objetivos | 15 |
| 1.2 Metodologia | 16 |
| 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA..... | 18 |
| 2.1 Customização em massa | 18 |
| 2.2 Customização em massa para a provisão de habitações | 41 |
| 2.3 Building Information Modeling e modelagem algorítmico paramétrica | 49 |
| 3 DESCRIÇÃO DOS PROCESSOS..... | 61 |
| 3.1 Subsistema de design de um sistema de customização em massa para habitações de interesse social..... | 61 |
| 3.2 Levantamento das informações contextuais específicas de aplicação da pesquisa (elicitação)..... | 66 |
| 3.3 Desenvolvimento do universo de soluções possíveis | 73 |
| 3.4 Implementação do sistema de geração de projetos (BIM + modelagem algorítmica paramétrica) | 110 |
| 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES | 116 |
| 4.2 Discussão..... | 122 |
| 5 CONCLUSÃO..... | 124 |
| REFERÊNCIAS..... | 129 |
| APÊNDICE A – TRABALHOS ANALISADOS | 137 |
| APÊNDICE B – PARÂMETROS DE PROJETO..... | 139 |
| APÊNDICE C - RELATÓRIOS DOS PROJETOS | 148 |

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, a produção de unidades habitacionais de interesse social, baseia-se amplamente em uma estratégia de padronização de soluções projetuais e dos processos construtivos para redução do custo total da obra. De acordo com Taube e Hirota (2017), embora a padronização em massa seja uma estratégia eficiente para a redução do valor monetário das unidades, as tipologias padronizadas de projeto não atendem a outro critério de valor: as necessidades individuais dos usuários. Segundo as autoras, além deste impacto negativo direto, o problema se estende ao programa habitacional, uma vez que a inadequação das unidades gera baixa retenção dos imóveis. Assim, percebe-se que há uma relação direta entre a estratégia adotada e a percepção negativa da qualidade projetual das unidades.

Especificamente no Brasil, conforme afirma Macedo, Bijos e Santos (2017), o Programa Minha Casa Minha Vida (PMCMV), tratava do déficit quantitativo apenas a partir da oferta de domicílios por construção de novos imóveis e financiamento para a sua aquisição. Assim, para atingir tais metas quantitativas, a entrega das habitações pelo programa era fundamentada em uma estratégia de padronização dos processos construtivos para alcançar um alto número de unidades com redução de custos a partir da economia de escala.

Dado este cenário, o presente trabalho tem como tema central, o uso da customização em massa (CM), uma estratégia alternativa à produção em massa, para a provisão de habitação de interesse social. A CM é uma estratégia que busca promover valor a um produto a partir da sua adequação às necessidades específicas do usuário com manutenção dos custos próximos à produção em massa padronizada. De acordo com Avalone e Fettermann (2020), a aplicação da CM no setor habitacional da indústria da arquitetura, engenharia e construção (AEC) vem sendo estudada há aproximadamente 25 anos.

De fato, esta parece ser uma estratégia relevante para o setor habitacional, uma vez que diversos estudos apontam que junto com o preço da habitação, o grau de adequação do projeto às necessidades do usuário é visto como um dos principais critérios de valor para aqueles que irão adquirir uma residência (NIELSEN, BRUNOE, *et al.*, 2016; FETTERMANN, TORTORELLA e TABOADA, 2019; TAUBE e HIROTA, 2017; AVALONE e FETTERMANN, 2020; LARSEN, LINDHARD, *et al.*, 2019).

Conforme afirmado anteriormente, a CM permite a criação de valor a partir do atendimento dos requerimentos específicos do usuário final com a manutenção do preço do mercado de massa. Logo, pode-se dizer que esta é uma estratégia particularmente adequada ao setor habitacional. Tratando-se de conjuntos habitacionais, torna-se ainda mais relevante, uma vez que há um mercado de massa a ser atingido (BRANDÃO, PAIO e WHITELAW, 2017).

No entanto, existem aspectos relativos aos processos de projeto e produção que tornam a adesão dessa estratégia particularmente desafiadora aos agentes da indústria AEC. De acordo com Duarte (2001), (1) tradicionalmente em empreendimentos habitacionais, os projetistas contratados planejam um número limitado de soluções para serem replicadas devido às limitações das cognições humanas, uma vez que seria necessário um tempo muito elevado ou uma equipe demasiadamente grande para desenvolver um número de soluções correspondente a cada usuário. Apesar dos avanços tecnológicos nos últimos 20 anos, esta ainda permanece uma realidade nos empreendimentos habitacionais de massa.

Junto a isso, conforme apontam Avalone e Fettermann (2020), (2) o processo de produção do setor é fragmentado, baseado em modo de produção linear, hierárquico e com controle centralizado. Esse panorama dificulta a implantação da estratégia, uma vez que a CM depende que os processos de produção e logística envolvidos sejam flexíveis, porém estáveis (PILLER, 2019). Tais características dependem de uma comunicação e troca de informação fluida, integrada e estável entre as diversas partes da cadeia de produção.

Dado este problema, o presente trabalho parte da premissa inicial de que existem duas tecnologias disponíveis, que ao serem integradas, contribuem para a viabilização da CM de habitações de interesse social: (1) a modelagem algorítmico-paramétrica permite que algoritmos sejam desenvolvidos e manuseados para automatizar soluções de projetos ou partes do processo de projeto, auxiliando projetistas na tomada de decisão, gerando maior número de soluções; (2) o *Building Information Modeling* (BIM), a partir modelagem de dados da construção, permite antecipar perdas, otimizar a colaboração entre profissionais e maior controle orçamentário e de prazos, o que favorece o um fluxo de informações maior. De acordo com Andrade e Ruschel (2011), a partir da modelagem paramétrica e da interoperabilidade do BIM é possível compatibilizar diferentes disciplinas em tempo

real, controlar os custos e simular o desempenho do edifício durante todo o seu ciclo de vida, além de outras vantagens.

Assim, o presente trabalho apresenta o desenvolvimento de uma plataforma de projetos voltado para CM de habitações unifamiliares, com base na comunicação entre a modelagem algorítmica-paramétrica e a modelagem de dados BIM. Esta plataforma teve seu desenvolvimento e sua aplicação voltados a um contexto específico alinhado com o cenário prático do setor habitacional. Espera-se que a sistematização dos processos possa colaborar com aplicações futuras e posteriores desenvolvimentos.

Para isso, essa dissertação divide-se em três partes. No capítulo 2 são apresentados os fundamentos teóricos para compreensão dos temas pertinentes, definição do recorte da pesquisa e embasamento técnico para as aplicações práticas. O capítulo 3 apresenta sistematicamente o desenvolvimento da plataforma com detalhamento dos processos. O capítulo 4 apresenta os resultados das atividades executadas para testagem e avaliação da plataforma e as discussões pertinentes.

1.1 Objetivos

- a) **objetivo geral:** Desenvolver, sistematizar e documentar uma plataforma de projetos voltada para a CM de habitações unifamiliares, com base na comunicação entre o BIM e o ambiente de modelagem algorítmica-paramétrica, capaz de gerar variações topológicas e dimensionais com controle dos custos de produção associados ao projeto.
- b) objetivos específicos:
 - **Objetivo 1:** compreender conceitos pertinentes ao tema proposto: CM; dinâmicas da provisão habitacional de interesse social; modelagem algorítmico-paramétrica; BIM;
 - **Objetivo 2:** desenvolver um sistema de projetos para CM de habitações unifamiliares, dentro de um contexto específico, a partir da comunicação entre a modelagem algorítmico-paramétrica e a modelagem de dados em BIM;

- **Objetivo 3:** verificar os resultados do sistema desenvolvido quanto à variabilidade de soluções projetuais de acordo com demandas específicas e controle de custos de produção associada aos projetos gerados.

1.2 Metodologia

Foi utilizada a combinação de procedimentos experimentais, de simulação e de comparação com o objetivo de manipular a interoperabilidade entre o ambiente de modelagem algorítmico-paramétrico e o BIM para simulação de uso do sistema desenvolvido. Ao ser aplicado em um projeto para provisão de habitações customizadas em massa, dentro de um contexto específico, foi almejado a geração de resultados de projeto com o custo final para produção das habitações customizadas. Por fim, os resultados gerados foram utilizados para estimar quantitativamente a variabilidade de opções projetuais e avaliar sua relação com o controle de custos.

1.2.1 Procedimentos metodológicos

- a) **revisão bibliográfica (objetivo 1):** pesquisa bibliográfica para definição das bases teóricas, apoiada tanto em textos “clássicos”, como em textos que expressem o estado-da-arte dos assuntos pertinentes;
- b) **Análise de um contexto específico (objetivo 2):** escolha de um estudo caso para simulação de demandas e aplicação do sistema. Foram levantados os seguintes dados: características físicas do terreno e do entorno; legislação local; aspectos culturais; barreiras e potencialidades; perfil das famílias (composição familiar, fontes de renda, renda, coabitação, etc.);
- c) **modelagem algorítmico-paramétrica (objetivo 2):** modelagem algorítmico-paramétrica utilizando o software Rhinoceros da empresa Robert McNeel & Associates associado ao ambiente de programação visual integrado Grasshopper;

- d) **modelagem de dados (objetivo 2):** modelagem de dados do sistema e criação das famílias de objetos dentro do ambiente BIM utilizando o software Revit da empresa Autodesk.
- e) **simulação de demandas (objetivo 3):** formulação de perfis familiares específicos, com base nos dados levantados sobre a população do contexto. Foram atribuídos números a estas características combinadas randomicamente para geração de diferentes perfis familiares. A partir das combinações geradas foi feita a simulação de demandas e dos programas das habitações;
- f) **verificação do controle de custo (objetivo 3):** parte da comparação entre os orçamentos dos projetos desenvolvidos baseado em duas referências. As referências de preços e insumos do Sistema de Pesquisa de Custos e Índices (SINAPI) e do valor de referência para projetos residenciais de baixo padrão baseado nos valores de Custo Unitário Básico de Construção (CUB/m²), desenvolvido pela Câmara Brasileira da Indústria da Construção.
- g) **verificação da variabilidade e customização de projetos (objetivo 3):** avaliação das soluções projetuais geradas pelo sistema de CM para verificar se correspondem aos programas simulados e o custo final proposto. Levantamento do número de soluções que o sistema é capaz de gerar a partir de método de análise combinatória.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Customização em massa

CM pode ser definida como um oxímoro construído a partir dos dois paradigmas opostos, produção em massa e produção customizada, para a criação de um terceiro paradigma válido. Trata-se de uma estratégia baseada na produção em larga escala de bens sob medida com o objetivo de criar valor a partir do atendimento às demandas particulares dos consumidores com um preço acessível.

A customização pura se baseia na produção de bens sob demanda e sob medida via readequação de um determinado produto e de toda a sua cadeia de produção (PILLER, 2019). Antes da Revolução Industrial este era o modo de produção vigente, e devido aos seus processos artesanais, determinados produtos poderiam ser inacessíveis para as classes mais populares (KAPLAN e HAENLEIN, 2006).

De acordo com Kaplan e Haenlein (2006), após a Revolução Industrial, no século XIX, a tecnologia emergente permitiu a troca implícita de níveis maiores de customização por preços menores, o que de acordo com Pine II (2019), abriu caminho para o desenvolvimento de uma estratégia para atingir mercados de massa, denominada produção em massa. Essa estratégia é baseada na padronização dos componentes e do produto, e na sistematização e segmentação dos processos para produzir em grandes quantidades, o que permite alta lucratividade devido à economia de escala (BENROS e DUARTE, 2009). A primeira pessoa a adotá-la na prática foi Henry Ford no início do século XX, o que permitiu transformar o automóvel em um bem popular. Com o sucesso de Ford, a padronização em massa passou a ser adotada por outras indústrias, revolucionando a economia global e o modo de vida das pessoas (KAPLAN e HAENLEIN, 2006; BENROS e DUARTE, 2009; PINE II, 2019).

A segunda metade da década de 1950 e a década de 1960 podem ser caracterizadas como um período de transição sociocultural e dos padrões de consumo, onde observa-se a valorização do individual em detrimento do coletivo (NESBITT, 2006), refletindo em demandas de consumo mais heterogêneas (SQUIRE, READMAN, *et al.*, 2004; KAPLAN e HAENLEIN, 2006; PILLER, 2019). Conseqüentemente, ocorre primeiro uma fragmentação do mercado de massa para um mercado segmentado, e posteriormente a subdivisão em mercados de nichos

(PINE II, 2019). Por esse motivo, os fabricantes são forçados a criar portfólios de produtos cada vez mais variados que atendam às demandas dos nichos de mercado a partir de novas estratégias de produção (PILLER, 2019).

Nos anos 1970, a Toyota, uma empresa da indústria automobilística, desenvolve uma dessas novas estratégias, chamada de manufatura enxuta (*lean production*). Tal estratégia é baseada na redução de tempo e custos de produção a partir de processos de produção mais reduzidos que visavam evitar o desperdício de recursos, reduzir os estoques a partir de uma comunicação mais eficiente e direta com o consumidor. Também, consiste em uma política de melhoramento contínuo e novas formas de alocar os trabalhadores, que agora não trabalhavam em uma única tarefa segmentada, mas em pequenas equipes responsáveis por todas as operações necessárias para a produção de um único projeto (BENROS e DUARTE, 2009). Ainda assim, conforme apontam Kaplan e Haenlein (2006), mesmo com o desenvolvimento de novas estratégias eficientes para a produção, o aumento da demanda fragmentada deixou para os fabricantes do século XX duas abordagens a serem escolhidas: (1) produção com custo e tempo reduzidos e com variedade limitada; (2) produção customizada a preço e custo elevados.

No entanto, ainda nos anos 1970, Toffler (1970 apud KAPLAN e HAENLEIN, 2006) anteviu que um novo paradigma colocaria em questão a necessidade de escolha de uma abordagem em detrimento da outra. Quase duas décadas depois, Davis (1987) deu nome a este paradigma e cunhou o termo customização em massa. Davis notou que a última consequência da constante segmentação do mercado seria a dissolução dos mercados de nicho em demandas de uma só pessoa (*markets of one*). Com o desenvolvimento de novas tecnologias digitais, tornaria necessário e possível esta nova estratégia (DAVIS, 1987). Este conceito foi posteriormente sistematizado por Pine II (1991) em sua dissertação de mestrado que foi convertida em um livro responsável pela disseminação dessa prática.

Desde então, diversos estudos emergiram em torno da CM, assim como aplicações práticas de sucesso em empresas nas mais variadas indústrias (KAPLAN e HAENLEIN, 2006; PILLER, 2019). Porém, mais de 30 anos depois, percebe-se que há pontos de divergências em torno de uma definição mais precisa do conceito. A Tabela 1 apresenta os principais autores consultados e as suas respectivas áreas de atuação.

Tabela 1: Campo de atuação dos principais autores consultados. Fonte: Autores.

| Autores | Campo de atuação |
|---|------------------------------|
| José P. Duarte | Arquitetura |
| Branko Kolarevic, José Pinto Duarte | Arquitetura |
| B. Joseph Pine II | <i>Business</i> ¹ |
| Frank Piller | <i>Business</i> |
| Stanley M. Davis | <i>Business</i> |
| B. Joseph Pine II, Bart Victor, A. Boyton | <i>Business</i> |
| Christopher Hart | <i>Business</i> |
| Jams H. Gilmore, B. Joseph Pine II | <i>Business</i> |
| Paul Zipkin | <i>Business</i> |
| Nikolaus Franke, Frank Piller | <i>Business</i> |
| Brian Squire, Jeff Readman, Steve Brown, John Bessant | <i>Business</i> |
| Andreas M. Kaplan; Michael Haenlein | <i>Business</i> |
| Thorsten Blecker, Nizar Abdelkafi | <i>Business</i> |
| Fabrizio Salvador, Pablo Martin de Holan, Frank Piller | <i>Business</i> |
| Flavio S. Flogiatto, Giovani J.C. da Silveira, Denis Borenstein | Produção |
| Huiwen Zhao, Leigh McLoughlin, Valery Adzhiev, Alexander Pasko | Produção |
| Pratap Chinnaiyah, Sagar V. Kamarthi, Thomas P. Cullinane | Produção |
| Juha Tiihonen, Alexander Felfernig | Ciência da computação |

¹*Business* pode ser definido como o campo que envolve uma série de áreas correlatas, cujas principais são: administração, economia, marketing.

2.1.1 Conceito

A seguir, busca-se estabelecer uma definição precisa do conceito de CM a ser adotado pelo presente trabalho. Para isso, é feita análise das definições de alguns dos principais autores do tema, onde busca-se apontar algumas das principais diferenças, e suas razões de assim serem entre as definições.

Algumas definições próximas, porém, com diferenças sutis, de alguns dos principais autores sobre essa nova prática no campo da produção de bens e serviços ilustram essa divergência. Davis (1987) cunhou o termo ao vislumbrar a possibilidade de um produto ou serviço atingir um público de massa (economia industrial) e ao mesmo tempo tratá-los de forma individualizada (economia pré-industrial). Pine II (1993), definiu como “[...] criação de variedade e customização a partir de flexibilidade e respostas rápidas”, com o objetivo de “[...] desenvolver, produzir e vender bens e serviços acessíveis com variedade e customização para que aproximadamente qualquer pessoa possa encontrar exatamente aquilo que quer”. No entanto, mais recentemente, o autor fez uma nova proposta mais simples, porém mais radical, onde CM seria “eficientemente servir os consumidores de forma única” (PINE II, 2019). Gilmore e Pine II (1997) afirmaram que existem quatro abordagens para a CM e que em uma delas, classificada como adaptativa, a customização ocorreria após a entrega do produto ao consumidor.

Hart (1995), divide o conceito em duas definições possíveis: A primeira é a definição “visionária”, que coloca a CM como a habilidade de atender qualquer requisito específico do consumidor, à pronta-entrega, em qualquer lugar e da forma que o consumidor preferir, e ainda assim obter uma margem de lucro. A segunda é a definição prática, e trata-se da produção de produtos e serviços variados e possivelmente customizados com o mesmo custo de produção padronizada, fabricados em massa a partir do uso de processos e estruturas organizacionais flexíveis. Hart afirma que a definição visionária não deve ser desconsiderada, mas deve ser utilizada como um ideal a ser atingido para promover uma política de melhoramento contínuo da prática. Posteriormente, esta separação em duas visões do conceito é aceita e utilizada por Fogliatto, Silveira e Borenstein (2012) para formularem sua própria definição.

Na visão de Zipkin (2001) não são atribuídas condições relacionadas ao valor monetário, considerando uma estratégia de negócios baseada na capacidade de uma companhia oferecer produtos ou serviços sob medida. Salvador, Holan e Piller (2009), em sua abordagem também não fazem especificações de custo ao definirem a CM como um mecanismo estratégico a partir de capacidades específicas para o alinhamento de um empreendimento com as necessidades do consumidor. No entanto, posteriormente Piller (2019) atribui a acessibilidade de custo como propriedade inerente da CM. O autor também afirma que a customização pode ocorrer após a entrega do produto e não somente nas fases operacionais. Finalmente, Kolarevic e Duarte (2019) definem como “capacidade de negócios e marketing contemporânea que visa atender as necessidades individuais dos consumidores”.

Em um estudo aprofundado em cima das definições propostas por diversos autores, Kaplan e Haenlein (2006), afirmam que três questões fundamentam as principais divergências em torno do conceito. (1) A CM se aplica somente a produtos ou também aos serviços? (2) Qual o ponto da cadeia de valor em que o consumidor de fato customiza seu produto? (3) O valor de produção e de venda dos bens customizados em massa deve ser próximo comparado com os bens padronizados produzidos em massa?

Os autores argumentam que os serviços, diferentemente dos produtos, não podem ser estocados para criação de valor a partir da economia de escala e dependem diretamente da interação com o usuário final em tempo real para gerar tal valor. Embora o setor de serviços tenha adotado estratégias adaptadas da produção em massa para reduzir custos, eles são por natureza customizados e, portanto, a CM seria redundante. A resposta para a segunda pergunta se baseia na ideia de que a CM, diferentemente da padronização em massa, utiliza a interação com o usuário final para a criação de valor do produto. No entanto, este valor, proveniente das demandas do usuário final, deve estar no produto em si, seja a partir das suas características funcionais ou estéticas. Logo, essa interação está limitada aos processos operacionais de criação de valor do produto. Sendo assim, seria impossível que a interação ocorresse antes dessa fase, e caso ocorra após a produção, por exemplo durante as fases de venda ou distribuição, é recomendado que se utilize outra terminologia. Com relação a última questão, os autores afirmam que parte do valor da CM está em entregar um produto customizado por um preço acessível a um mercado

de massa, pois existem outros fatores além do preço e da customização atribuídos ao valor final do produto, como o esforço do consumidor e o tempo de entrega, que já são inevitavelmente alterados. Sendo assim, é necessário que o produto possua valor monetário menor, ou igual, ou no máximo com um pequeno acréscimo, que não afete a sensibilidade do consumidor ao produto.

Após a análise desses três aspectos, os autores propõem uma definição muito alinhada com a estabelecida por Hart (1995), porém mais precisa. Para eles, a CM poderia ser conceituada a partir de duas visões: operacional (*working*) e visionária. Os autores concordam com Hart ao colocarem a definição visionária como parâmetro para o melhoramento contínuo das operações da empresa.

Definição operacional — estratégia que agrega valor a partir de alguma forma de interação entre consumidor e fabricante durante os estágios operacionais de fabricação e montagem para criar produtos customizados com custos de produção e valor monetário similares aos produzidos em massa

Definição visionária — estratégia que agrega valor a partir de alguma forma de interação entre consumidor e fabricante durante o estágio operacional de design para criar produtos customizados, seguindo uma estratégia híbrida que combina liderança de custo e de diferenciação. (KAPLAN e HAENLEIN, 2006, p. 177).

De tal forma, é possível observar que para Kaplan e Haenlein (2006), a CM (1) se aplica somente aos produtos e não aos serviços, (2) a customização só acontece durante as fases operacionais do produto, ou seja, durante o design (visionária), ou fabricação, e/ou montagem (operacional), e por último, (3) o preço monetário e o custo de produção dos produtos customizados em massa deve ser similar ao dos produtos padronizados em massa. A fase operacional da cadeia de valores pode ser localizada no diagrama da Figura 1.

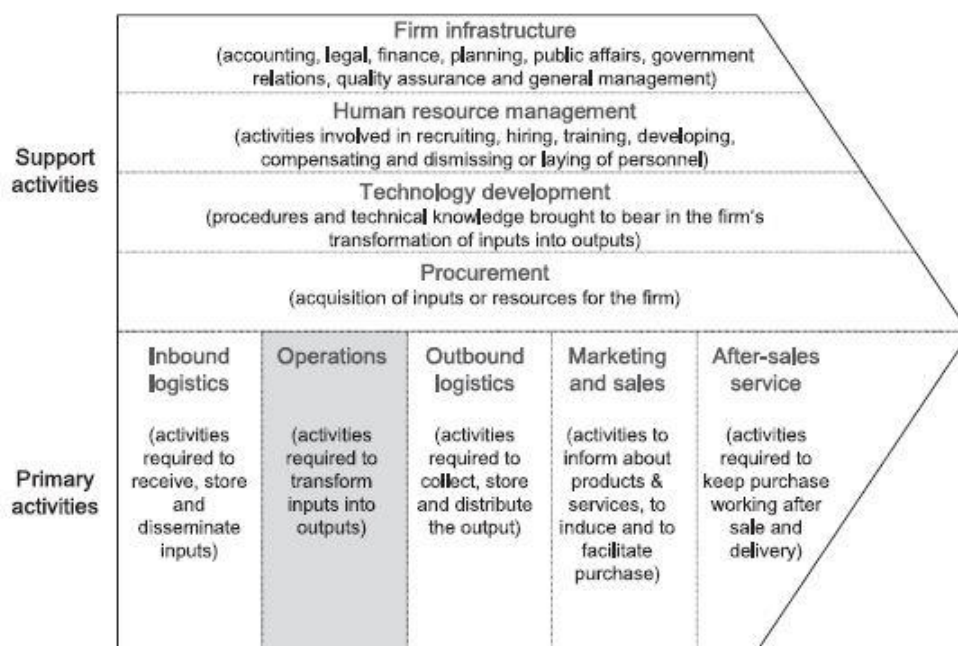


Figura 1: Cadeia de valores tradicional de Porter com destaque (em cinza) da fase de operações, único ponto em que a customização poderia ocorrer. Fonte: (KAPLAN e HAENLEIN, 2006).

Para essa pesquisa, adotamos a definição de Kaplan e Haenlein (2006), com a ressalva de que a inserção das tecnologias computacionais contemporâneas permite que a CM durante a fase operacional de projeto não seja mais atribuída somente a uma definição visionária de CM. E por isso, adota-se a seguinte definição: customização em massa é uma estratégia que agrega valor ao produto final a partir de alguma forma de interação proporcionada pelo empreendimento, entre o consumidor e fabricante, durante os estágios operacionais (projeto, fabricação e montagem), para criar variabilidade de soluções com custos de produção e valor monetário similares aos produzidos em massa.

Construída e estabelecida uma definição formal de CM, faz-se necessário compreender quais são os processos que viabilizam essa estratégia e quais as capacidades necessárias para colocá-los em ação.

2.1.2 Capacidades e processos

De acordo com Pine II, Victor e Boynton (1993), a CM depende de uma rede dinâmica entre unidades operacionais relativamente autônomas. O sucesso e eficácia desta rede estaria na capacidade da comunicação entre esses módulos ser instantânea, viável economicamente e flexível, porém, com consistência e conformidade (PINE II, VICTOR e BOYNTON, 1993). Analisando a definição de rede dinâmica, conforme citado anteriormente, percebe-se semelhança com a descrição de sistemas e subsistemas dada por Mitchell (2008), onde um sistema pode ser descrito como um conjunto de componentes e conexões funcionais e ter seus limites internos definidos a partir da sua divisão em subsistemas semi-independentes que interagem de forma bem definida entre suas interfaces. Logo, com base nessa comparação, é possível afirmar que o processo de CM de determinado produto pode ser definido como um sistema (rede) formado por subsistemas (unidades operacionais) semi-autônomos, com funções bem definidas, e que a capacidade de sucesso de funcionamento desse sistema reside nas qualidades das suas conexões funcionais internas (interfaces). Após Pine II, Victor e Boynton (1993), diversos outros autores propuseram-se a definir e classificar essas unidades e capacidades.

Hart (1995), define quatro grupos necessários para a CM: (1) uma equipe de marketing dedicada à formulação de estratégias de comunicação com os usuários potenciais e usuários finais, para a extração das suas necessidades e os sacrifícios que se dispõem a fazer (2) uma equipe de design capaz de criar um escopo de soluções possíveis com base nos dados extraídos dos possíveis usuários e converter as necessidades dos usuários finais em produtos; (3) uma equipe de produção responsável pela fabricação e montagem; (4) uma equipe de distribuição responsável pelo suprimentos e entrega do produto final. As capacidades necessárias para o sucesso da empresa estariam na comunicação efetiva entre a equipe de marketing e de design para a definição do escopo de soluções, na interatividade entre a equipe de design com o usuário final e a equipe de produção para o desenvolvimento do produto com base nas necessidades e avaliação do usuário e, por último, no alinhamento entre produção e logística.

Para Zipkin (2001), embora o autor não defina formalmente equipes ou grupos responsáveis, existem três capacidades básicas que dependem da conexão entre

alguns processos. A primeira, chamada de elicitación, depende da comunicação entre os dados extraídos do consumidor final, conversão em um produto e captação da sua reação. A segunda, definido como processos flexíveis, envolve as capacidades de dar materialidade ao produto a ser gerado. Em outras palavras, a comunicação entre o design do produto e o sistema de produção da empresa, composto por fabricação e montagem. A terceira capacidade, definida como logística, diz respeito a todo o fluxo de informação entre as etapas anteriores para elaboração da cadeia de suprimentos e a distribuição do produto.

A terceira classificação analisada, elaborada por Salvador, Holan e Piller (2009), tem sido comumente aceita na literatura e utilizada diretamente ou indiretamente por outros autores. A primeira é definida como desenvolvimento do universo de soluções e depende da captação das necessidades e sacrifícios do consumidor e uso dessas informações para definir quais componentes do produto serão customizados e o quanto poderão ser customizados. A segunda capacidade, nomeada como projeto de processos robustos, envolve a otimização dos recursos da empresa para materialização dos produtos gerados a partir do universo de soluções de forma sustentável, a partir de processos de produção e logística flexíveis, porém estáveis. A última capacidade é classificada como navegação de escolha, e envolve a interação eficiente entre a empresa com o usuário final para a formulação do produto com base nas necessidades e avaliação em tempo real do usuário e geração de informações de manufatura para produção.

Por fim, Duarte (2019), define que a CM de produtos requer um sistema composto por duas partes principais. A primeira, um subsistema para elaboração do projeto do produto, capaz de captar e utilizar dados externos do usuário final para gerar soluções de projeto. A segunda, um subsistema de produção capaz de materializar o projeto gerado. Percebe-se que para Duarte (2019), as atividades dentro do subsistema de projeto dependem da extração de dados contextuais e, portanto, deve haver um subsistema interno capaz de extrair esses dados. No entanto, o autor não cita atividades relacionadas à logística. Por fim, se a CM nesse caso é definida como um sistema, é possível inferir que a capacidade de sucesso está na comunicação entre suas partes.

| Unidades operacionais (Pine, Victor e Boyton, 1993) | Comunicação (Pine, Victor e Boyton, 1993) | | | |
|---|--|---------------------|--|--|
| Subsistemas | Capacidades das conexões funcionais | | | |
| | Hart (1995) | Zipkin (2001) | Salvador, Holan, Piller (2009) | Duarte (2019) |
| Elicitação | Conversão das necessidade em um escopo de soluções possíveis | Elicitação | Desenvolvimento do universo de soluções | Desenvolvimento de um sistema de projeto |
| Design | Interatividade cliente final x design x produção | Processos flexíveis | Navegação de escolha | |
| | Produção | | Ajuste dos processos de produção e logística | Projeto de processos robustos |
| Logística | | | Logística | |

Figura 2: Representação esquemática da comparação das capacidades para a customização em massa (HART, 1995; ZIPKIN, 2001; SALVADOR, HOLAN e PILLER, 2009; DUARTE, 2019), com os subsistemas identificados e com os termos utilizados por Pine II, Victor e Boynton (1993).

A Figura 2 mostra a análise, a partir de um esquema de cores, das capacidades definidas pelos autores comparando-as entre si, com a definição dada por Pine II, Victor e Boynton (1993), e com subsistemas definidos com base nas descrições dos processos pelos autores. Fica claro que na maior parte dos casos, as capacidades estão localizadas na interface entre esses grupos de processos, ou seja, nas conexões funcionais entre estes subsistemas, atribuindo conformidade com o que foi descrito por Pine II, Victor e Boynton (1993).

Logo, com base nesta análise, é possível definir que a CM pode ser interpretada como um sistema composto por quatro subsistemas semi-autônomos. O primeiro sistema deve extrair os dados dos possíveis usuários e outras informações contextuais. O segundo sistema deve ser capaz de desenvolver os projetos (ou design) do produto com base nas necessidades e validação do usuário. O terceiro sistema deve ser capaz de materializar o produto. O quarto sistema deve ser capaz

de fornecer suprimentos à produção e distribuir o produto para o usuário final. Além das funções internas de cada subsistema, o sucesso do sistema como um todo reside em três capacidades específicas das conexões funcionais dos subsistemas entre si e com o usuário: (1) a conexão entre o subsistema de extração de dados e o subsistema de design para a produção de um universo de soluções; (2) a interação entre o subsistema de design com o usuário final para a consideração de suas necessidades e sua validação; (3) a estabilidade entre o sistema de design, produção e logística para que o produto chegue ao usuário final de forma sustentável para a empresa. Os possíveis desdobramentos desse sistema podem variar em cada caso, dependendo: das características do produto e suas qualidades intrínsecas; do ponto de participação do usuário final; dos meios utilizados, tais quais as tecnologias e métodos organizacionais, para que cada componente exerça sua função corretamente e para que a conexão entre estes componentes ocorra com sucesso. A seguir os subsistemas serão analisados em profundidade para que possam ser compreendidas as estruturas internas de cada um, as interfaces entre eles e possíveis variações.

2.1.3 Análise e descrição dos subsistemas

Para a descrição dos subsistemas foi utilizado o recurso do diagrama como ferramenta de representação e de análise e, por isso, faz-se necessário breve introdução sobre este recurso e como ele foi utilizado. Compreende-se que trata-se de uma ferramenta apropriada para o estudo de sistemas, uma vez que o diagrama é “[...] um ícone que torna inteligíveis as relações, sobretudo espaciais, entre as partes que constituem um objeto” (MONTANER, 2017, p. 9) e que além disso, “[...] absolutamente não esgota as tentativas de revelar relações inesperadas e imprevisíveis” (MONTANER, 2017, p. 10). Em outras palavras, o diagrama é um recurso capaz de representar de forma abstrata um objeto a partir de suas relações estruturais e no seu exercício tem a capacidade de revelar relações que dificilmente poderiam ser enxergadas de outras formas. Adota-se uma adaptação da notação gráfica para a definição de sistemas introduzida por Freeman e Newell (1971 (MITCHELL, 2008). As descrições funcionais dos subsistemas e componentes são representadas por formas geométricas simples com seu nome enquanto as conexões funcionais entre os subsistemas são representadas por setas de entrada e saída.

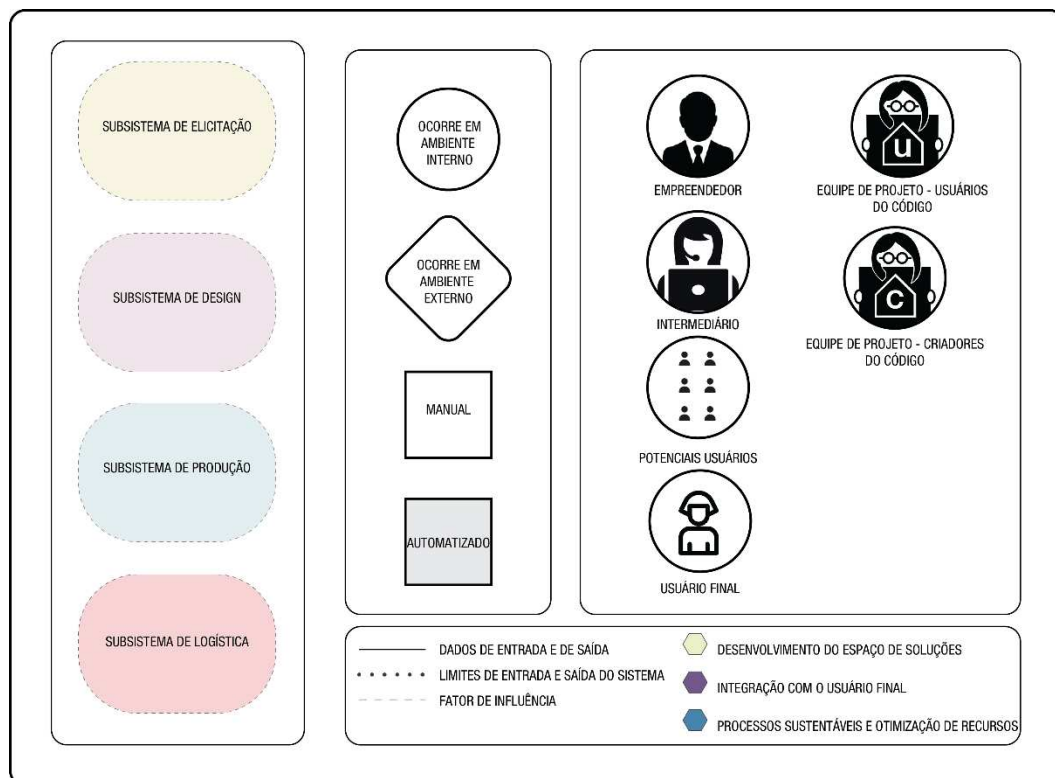


Figura 3: Quadro de legendas da análise diagramática. Fonte: Autor.

2.1.3.1 Subsistema de elicitação

Segundo Piller (2019), um dos principais desafios da CM é a identificação das necessidades idiossincráticas dos usuários. Ou seja, os atributos de um bem onde há maior necessidade de customização. O sistema de elicitação portanto, tem como objetivo a comunicação com o grupo de potenciais usuários para identificar as suas necessidades e desejos, além de ser capaz de fazer a leitura de dados contextuais necessários para formulação do design. (DUARTE, 2019; PINE II, 2019). Os dados de saída deste subsistema servirão de entrada para o subsistema de design.

Esse subsistema poderá ter diferentes configurações de acordo com o método e a técnica de pesquisa adotada para identificação e análise desses dados. Piller (2019) informa que podem ser utilizadas técnicas convencionais de extração e análise de dados como, por exemplo, entrevistas, questionários, etc. Segundo o autor, estas não são as mais adequadas para a CM, pois foram desenvolvidas para identificar características homogêneas ao invés da heterogeneidade necessária à customização. Logo, a mera extração de dados objetivos possivelmente não compreende a complexidade necessária para a formulação do produto arquitetônico e suas

variações. Existem diferentes técnicas e tecnologias para que esse sistema desempenhe sua complexa função, variando de coleta e análise de dados manuais, atividades presenciais com modelos físicos, até o uso de plataformas interativas e inteligência artificial (PILLER, 2019; AVALONE e FETTERMANN, 2020). Em todos os casos, independentemente do método e técnica, o subsistema sempre deverá ser capaz de extrair, ler e converter dados externos em informações úteis para serem interpretadas pelo subsistema de design. Na Figura 4 são apresentados subsistemas de elicitação interativo por via de plataforma eletrônica e convencional por via de formulário. No primeiro sistema são registradas informações oriundas da interação do grupo de usuários possíveis com uma atividade em um plataforma e posteriormente são convertidas em dados do artefato. No segundo, um sistema de extração de informações convencional, como um questionário, por exemplo, oferece dados para serem convertidos por um especialista.

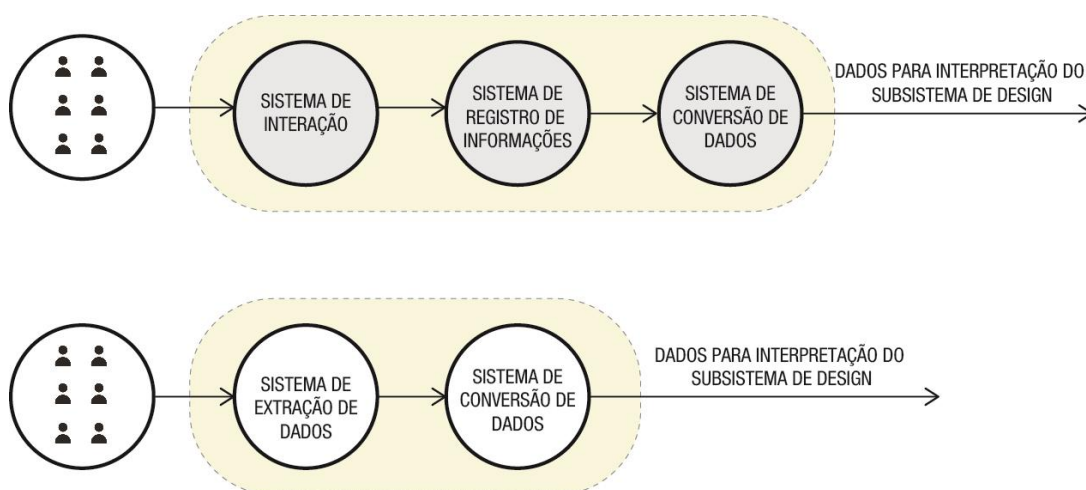


Figura 4: Exemplos de subsistemas de elicitação. De cima para baixo: interativo via plataforma eletrônica; convencional via formulário. Fonte: Autor.

2.1.3.2 Subsistema de design

Segundo Duarte (2019), o subsistema de design deve ser capaz de gerar o projeto a partir dos dados recebidos do sistema de elicitação, e pode ter diferentes configurações de acordo com o método de projeto e a tecnologia empregada, conforme será visto a seguir. Em todos os casos, diferentemente de empreendimentos padronizados, o processo de projeto deve ser explícito, ou seja, a lógica por trás das decisões de projeto deve ser conhecida e sistematizada para que possam ser

replicadas em contextos diferentes. Isso ocorre porque, conforme Piller (2019) afirma, a CM depende de processos flexíveis, porém estáveis, que permitam a geração de diferentes resultados de forma sustentável, diferentemente do modelo tradicional onde cada novo projeto está associado a um novo processo implícito, com maior ou menor grau de variação. Neste caso, faz sentido que o subsistema de design funcione de uma perspectiva computacional que, segundo Oxman (2006, p.243), explicita os processos cognitivos baseado na habilidade do arquiteto(a) de “[...] formular, representar, implementar e interagir com representações de conhecimento explícitas e bem formuladas”. A partir disso, podem ser tiradas duas conclusões: primeiro, o correto funcionamento do sistema de design está diretamente relacionado ao uso de tecnologias digitais. Segundo, se o subsistema de design depende de processos computacionais e tecnologias digitais, os seus dados de entrada, gerados pelo subsistema anterior, precisam ser dados objetiváveis, ou seja, passíveis de serem quantificados e computados.

São identificados cinco subsistemas internos ao subsistema de design a partir do trabalho de Oxman (2006) e Duarte (2019). Oxman (2006) define quatro componentes necessários, sendo eles: representação, geração, avaliação e performance. Duarte (2019) acrescenta um subsistema de formulação. A seguir, são apresentadas as funções de cada um deles:

- h) **Formulação (Duarte)**: capaz de ler e interpretar e converter as necessidades dos potenciais usuários em necessidades de projeto para a formulação de universo de soluções possíveis baseados em um sistema de regras;
- i) **geração**: capaz de gerar um universo de soluções de projeto, com regras e restrições responsáveis pela configuração de formas e características materiais dos resultados gerados.
- j) **avaliação**: analisa e compara o desempenho e adequação de diferentes alternativas projetuais geradas de acordo com as necessidades do usuário final;

- k) **desempenho**: buscar e encontrar a solução mais adequada às necessidades do usuário final com base na avaliação programática e contextual.
- l) **representação**: representa as soluções geradas nos seus mais variados aspectos (forma, espaço, valor monetário de produção e venda etc.).

O subsistema poderá ser mais ou menos automatizado de acordo com o método operacional e a tecnologia empregada. Estes fatores irão gerar mudanças na configuração da interação entre os subsistemas descritos acima que, por sua vez, definirão a configuração do subsistema de design. Não faz parte do escopo deste trabalho apresentar de forma aprofundada uma discussão sobre as possíveis abordagens de projeto, porém, vale a pena citar os modelos generativos, formativos e baseados em performance, conforme definidos por Oxman (2006). O primeiro, generativo, provém mecanismos computacionais para a geração de formas (OXMAN, 2006, p. 254). Podem ser citados como exemplo, a gramática de forma, algoritmos evolutivos, L-systems etc. (CAETANO, SANTOS e LEITÃO, 2019). O segundo, formativo, é um mecanismo baseado na lógica do processo de projeto para a criação de formas a partir da interação e operação com um ambiente de geração formal lógico e não-determinístico a partir de técnicas digitais (OXMAN, 2006, p. 250). O exemplo mais comum são os sistemas de design paramétrico, uma aproximação do design caracterizada pelo uso de parâmetros para descrever grupos de resultados de projeto (CAETANO, SANTOS e LEITÃO, 2019, p. 6). Os modelos baseados em performance se aproximam do modelo generativo, mas, são uma abordagem de projeto baseada na geração de soluções de acordo com o desempenho e o comportamento almejado (OXMAN, 2006, p. 257). Por último, existem também os modelos compostos que associam todas as funções dos modelos citados anteriormente. A seguir são apresentados alguns exemplos de subsistemas de design e suas respectivas configurações. Na Figura 5 no subsistema de design paramétrico, as necessidades do usuário são convertidas pelo projetista que interage com o sistema a partir da manipulação dos parâmetros. O sistema pode ou não ter um sistema de avaliação interno que atuará em conjunto a avaliação do projetista usuário do sistema. A comunicação do usuário final com o resultado é intermediada pelo projetista. Na

Figura 6, no subsistema de design baseado em desempenho, as necessidades são convertidas pelo projetista usuário do sistema. O sistema generativo define uma série de resultados que passam por um sistema de avaliação. Os resultados que passam pela avaliação são testados para escolher aquele com melhor performance. O resultado é aprovado ou não pelo projetista e pelo usuário final. Na Figura 7, a operação do subsistema de design composto para interação direto com o usuário, ocorre da mesma forma que o sistema anterior, no entanto, a formulação é feita pelo próprio sistema e a aprovação do resultado é feita diretamente pelo usuário.

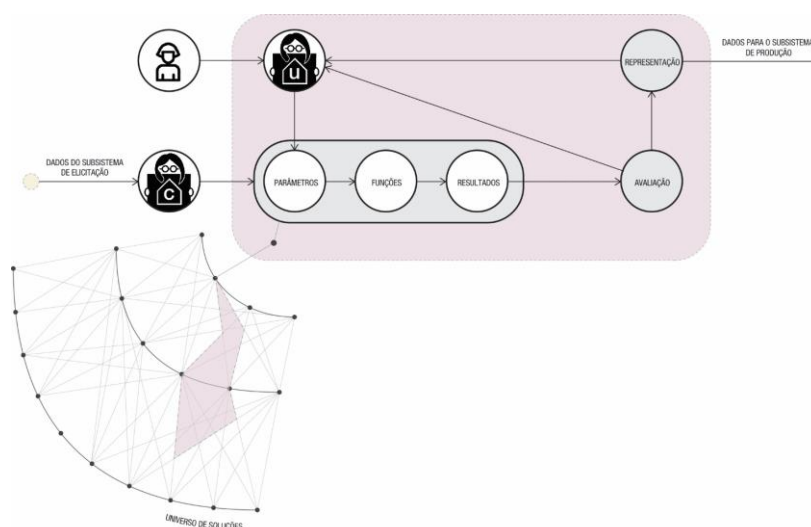


Figura 5: Exemplo de um subsistema de design paramétrico. Fonte: Autor.

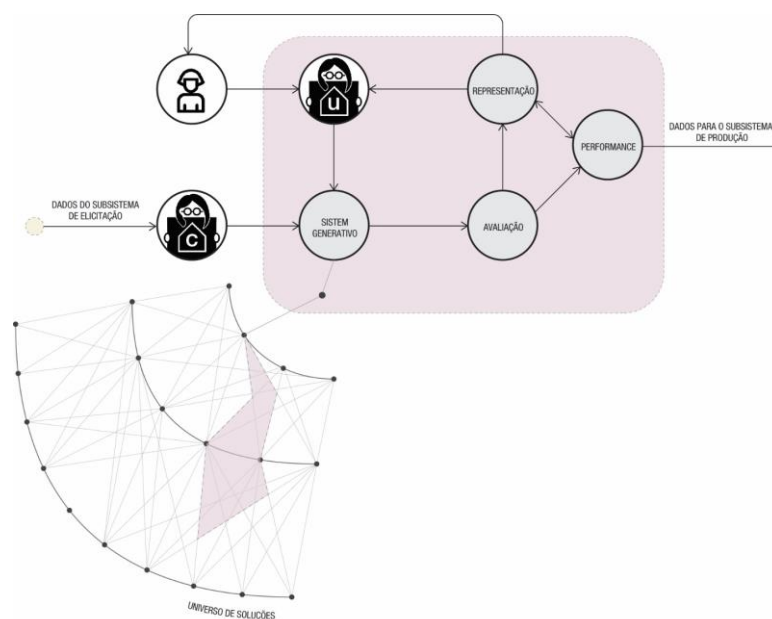


Figura 6: Exemplo de um subsistema de design baseado em desempenho. Fonte: Autor.

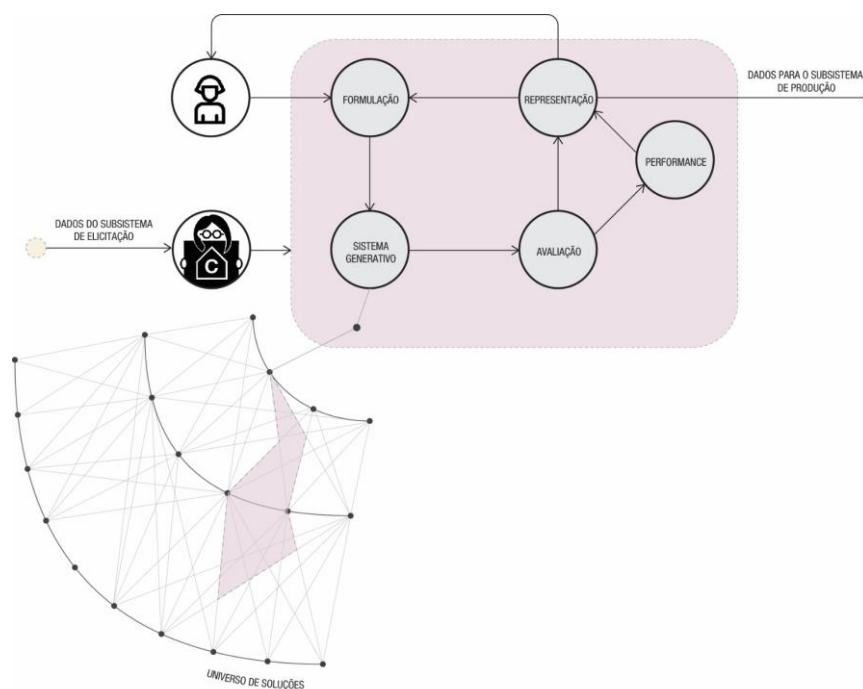


Figura 7: Exemplo de um subsistema de design composto para interação direta com o usuário.

Fonte: Autor.

2.1.3.3 Subsistema de produção

O subsistema de produção é responsável por materializar a solução de projeto gerada (COSTA, DUARTE e BÁRTOLO, 2017; DUARTE, 2019). Assim como o subsistema de design, necessita-se de processos flexíveis, porém estáveis, que permitam a produção de diferentes resultados de forma sustentável. No caso do processo de produção o principal fator de influência da sua configuração é a tecnologia empregada (COSTA, DUARTE e BÁRTOLO, 2017, p. 957; DUARTE, 2019, p. 131), seguido pelo método operacional permitido por tal tecnologia. Além disso, também será responsável por definir a interface entre este e o subsistema de design. Onde, a produção pode ter pouca ou muita influência sobre o processo de projeto, ou ainda total dependência entre ambos.

Três tecnologias foram identificadas: (1) produção artesanal, (2) produção industrial mecânica e (3) produção industrial digital. A primeira permite alta flexibilidade na produção, porém com baixa estabilidade e performance. Não é a mais indicada para a CM de habitações (DUARTE, 2019, p. 132), exceto nos casos em que, aspectos culturais favoreçam sua escolha, como quando há tradições de engajamento comunitário e do uso de materiais locais para o processo de construção (KOLAREVIC

e DUARTE, 2019, p. 8). A segunda é mais indicada por permitir método de produção modular, o que garante flexibilidade e estabilidade da produção, ao mesmo tempo que tem a vantagem da economia de escala do processo industrial (SMITH, 2010; PILLER, 2019, p. 34). A terceira, é controlada a partir de informações digitais oriundas de um modelo computacional (PUPO, CELANI e DUARTE, 2009, p. 440), o que permite alta flexibilidade com alta eficiência. Os objetos podem ser produzidos a partir de diferentes técnicas, classificadas como aditiva, subtrativa e conformativa (PUPO, CELANI e DUARTE, 2009), o que também irá influenciar na configuração do subsistema.

Com relação a interface entre os subsistemas de design e produção, na produção artesanal manual, não há influência direta devido aos processos lineares associados a esse tipo de produção (SMITH, 2010). Por outro lado, no processo de produção industrial mecânica, a correta sincronia dos seus processos horizontais depende das qualidades da coordenação ou compatibilização entre o projeto e a produção. Sendo assim, o subsistema de design precisa receber dados de entrada diretos, oriundos dos subsistemas de produção, que irão gerar restrições para o projeto. Na produção industrial digital, a manufatura ocorre diretamente a partir do modelo computacional e, portanto, design e fabricação estão diretamente correlacionados e dependem um do outro, não podendo ser tratados separadamente (PAOLINI, KOLLMANNSBERGER e RANK, 2019). Logo, a conexão entre os sistemas é tão próxima que eventualmente ocorrerá a sobreposição de um subsistema sobre o outro.

Finalmente, o subsistema de produção será composto por componentes de fabricação, montagem e ocasionalmente submontagem, que terão diferentes configurações de acordo com a tecnologia, o método e o local em que ocorrem. No entanto, no caso específico da produção de edificações inteira por manufatura aditiva, diretamente no canteiro de obras, esses dois subsistemas são concatenados (DUARTE, 2019, p. 132).

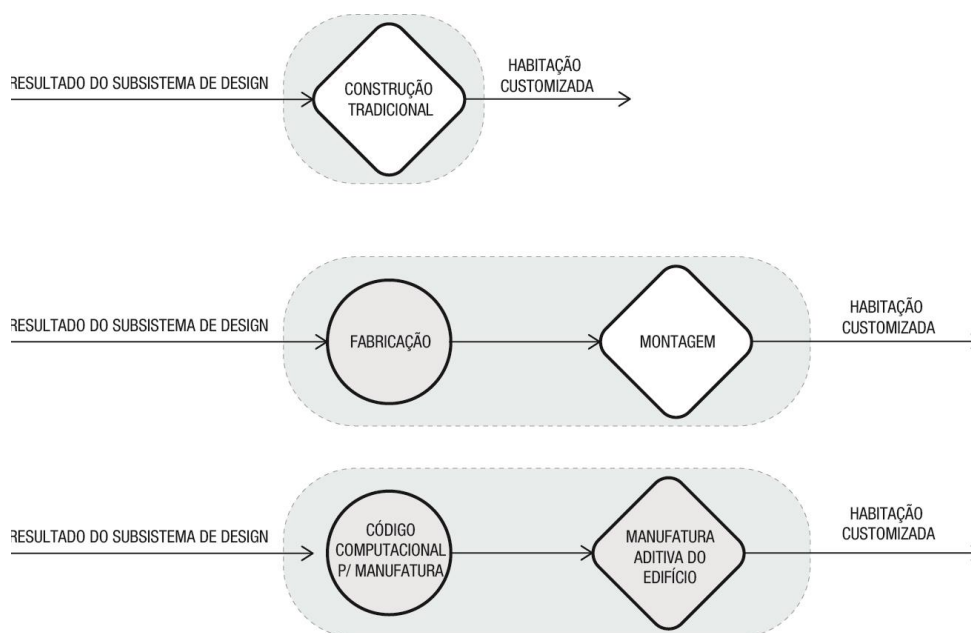


Figura 8: Exemplos de subsistemas de produção. De cima para baixo: tradicional artesanal diretamente no canteiro de obras; industrial pré-fabricado com montagem na obra; produção automatizada a partir da manufatura aditiva diretamente no canteiro de obras. Fonte: Autor.

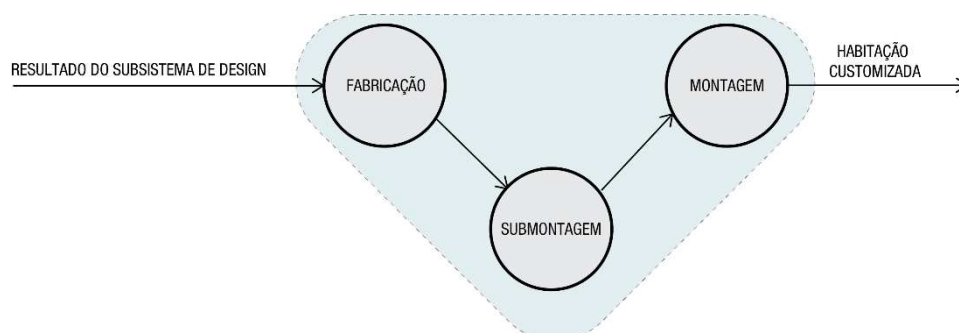


Figura 9: Exemplo de subsistema de produção com fase de submontagem de componentes anterior a montagem final. Fonte: Autor.

2.1.3.4 Subsistema de logística

Logística pode ser definida como os processos requeridos para assegurar o suprimento e armazenamento de matéria-prima, fluxo de informação através do processo de produção, embalagem, armazenamento e distribuição da produção (BARMAN e CANIZARES, 2015). Sendo assim, o subsistema de logística é responsável pelo correto funcionamento da cadeia de suprimentos e distribuição.

Segundo Piller (2019), existem dois fatores que aumentam o custo da produção de bens customizados: (1) aumento da complexidade e (2) aumento da incerteza das

operações do empreendimento. Sobre o primeiro fator, o aumento da variabilidade requer um número maior de partes, processos, fornecedores e canais de distribuição. Em outras palavras, um fluxo de informação mais complexo de ser gerenciado ao longo de toda a cadeia produtiva. No segundo caso, o aumento da incerteza ocorre devido às surpresas oriundas das diferentes demandas do usuário final, o ponto da cadeia de produção em que ela ocorrerá e seu efeito no custo de manufatura e distribuição (PILLER, 2019).

Por isso, Piller (2019) afirma que para aumentar o nível de certeza e estabilidade da produção, duas estratégias podem ser aplicadas. A primeira, a partir da implementação de tecnologias computacionais de automatização da produção que permitem alto nível de variabilidade com baixa interferência humana na produção. Porém, em algumas áreas, como é o caso da indústria AEC, tais tecnologias ainda não atingiram seu pleno potencial, ou não são viáveis economicamente (KOLAREVIC e DUARTE, 2019). A outra via é a manipulação da inserção do usuário final e a influência das suas demandas na cadeia de produção. Na produção industrializada, é possível atrasar o envolvimento deste usuário para uma fase posterior de montagem final da produção customizado. Nesse caso, os suprimentos são estabilizados, sendo possível alcançar economia de escala a partir da armazenagem de peças que formam conjuntos intermediários já montados para, posteriormente, com base em demandas específicas, formarem um produto específico e serem distribuídos ao usuário final (SMITH, 2019).

Dito isso, o subsistema de logística irá apresentar na maior parte das vezes, três componentes. O primeiro, abastecimento, refere-se a matéria prima necessária para a produção. O segundo, armazenamento, aparecerá quando houver estoque de conjuntos de elementos pré-montados para abastecer a montagem final. E, por fim, distribuição até o usuário final. No entanto, o armazenamento pode não ocorrer. É o caso de produtos produzidos a partir de tecnologia de manufatura aditiva para serem entregues diretamente ao usuário final. O subsistema de distribuição pode não aparecer quando a produção já ocorre no endereço do usuário final. Este é o caso das edificações produzidas *in loco*.

É possível perceber que a variação desse subsistema ocorre na sua estrutura interna. Porém, também ocorre conforme sua posição no sistema de CM e conexões com os subsistemas de projeto e produção. Tais variações irão depender da

especificação dos subsistemas de projeto e produção e do ponto de inserção do usuário final na cadeia de produção.

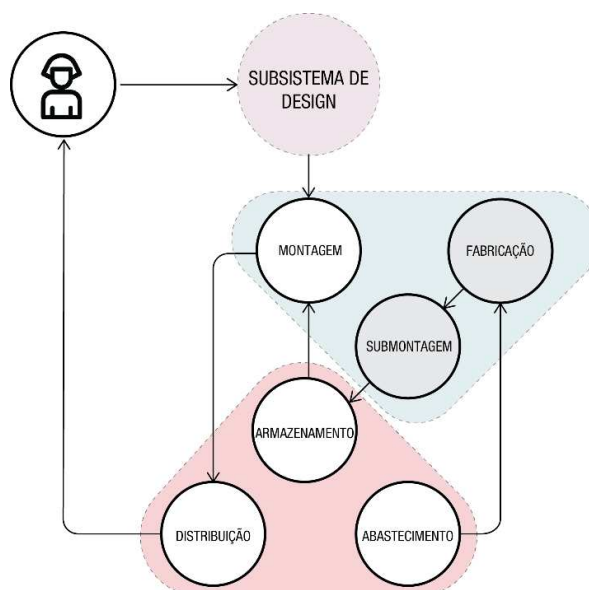


Figura 10: Exemplo do subsistema de logística na configuração de um sistema de edifícios com ponto de envolvimento do usuário na fase de montagem. Fonte: Autor.

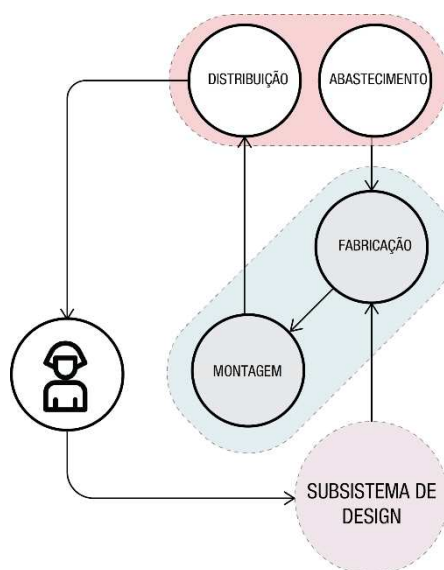


Figura 11: Exemplo do subsistema de logística na configuração de um sistema de CM com produção automatizada sob medida conforme requerimentos do usuário final. Fonte: Autor.

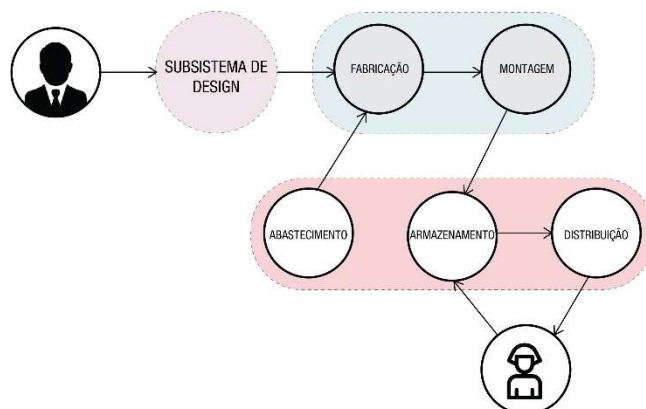


Figura 12: Exemplo subsistema de logística na configuração de um sistema de edifícios padronizados a partir da lógica especulativa com ponto de envolvimento do usuário ao final da produção. Fonte:

Autor.

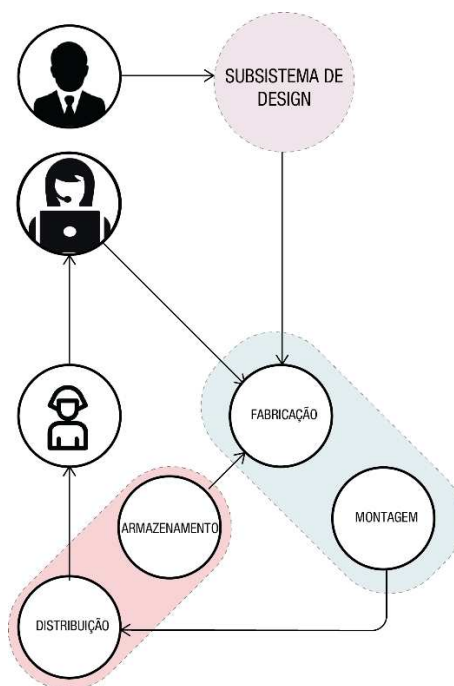


Figura 13: Exemplo de um subsistema de logística cuja produção ocorre com base em um catálogo pré-estabelecido.

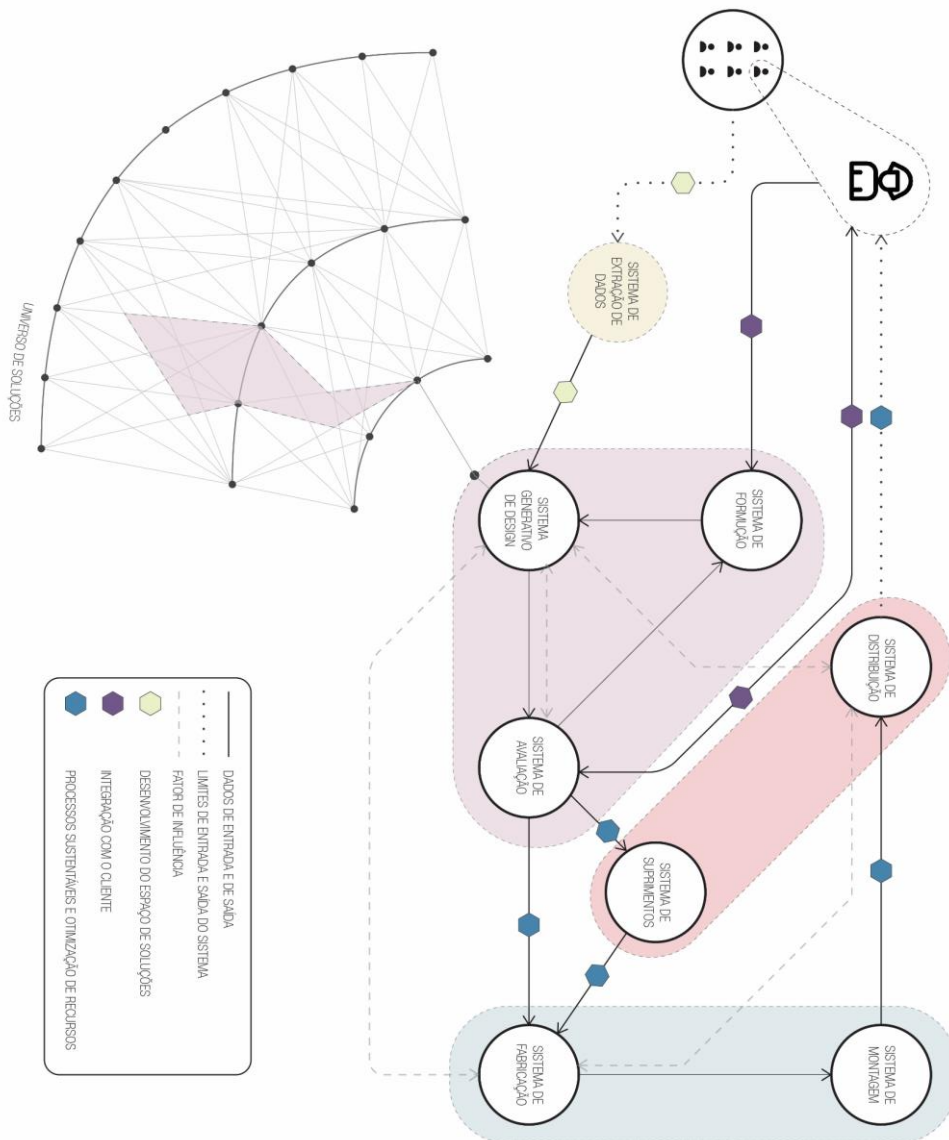


Figura 14: Representação diagramática de um sistema para produção customizada em massa de um produto genérico.

2.2 Customização em massa para a provisão de habitações

Antes de propor ações que viabilizem ou potencializem determinada estratégia a uma classe de produtos, no caso, CM de habitações, é necessário identificar se tal estratégia é viável e requerida pelos seus usuários finais. Este capítulo tem como objetivo sistematizar analiticamente estas questões. Para isso, primeiro, joga-se luz sobre o que é o valor de um produto. Esclarecer esse conceito é primordial para compreender adiante se a CM gera ou não valor para as habitações. Em segundo lugar será realizada breve análise da evolução da questão habitacional para identificar indícios de que a customização é, de fato, requerida. Em seguida, identificados os pontos anteriores, apresentam-se argumentos para indicar sua relevância para este setor. Por último, ponderam-se os desafios específico da CM na indústria AEC.

2.2.1 O valor de um produto

O primeiro grande desafio da CM é identificar se a customização de um produto oferecido é de fato requerida e valorizada pelos consumidores (PINE II, VICTOR e BOYNTON, 1993; HART, 1995; ZIPKIN, 2001; SQUIRE, READMAN, *et al.*, 2004; KOLAREVIC e DUARTE, 2019; PILLER, 2019). Conforme visto anteriormente, Davis (1987), previu que a crescente fragmentação do mercado acarretaria demandas tão heterogêneas que seria preciso atender às necessidades individuais de cada consumidor. Porém, conforme apontam Hart (1995) e Squire et al. (2004), a heterogeneidade de mercado não significa necessidade de customização, mas sim o aumento dos critérios de valor sobre um produto, dentre os quais estão a customização.

O valor de um produto está nas categorias de benefícios e sacrifícios que este oferece, como por exemplo, preço, tempo de espera, disponibilidade, marca, customização, quantidade, qualidade do design, atributos técnicos, entre outros. Obviamente, quanto maiores os benefícios e menores os sacrifícios, mais valor terá esse produto. No entanto, a customização como benefício pode não ser um critério de valor que faça sentido para os consumidores de determinado produto, principalmente se ela impõe sacrifícios em categorias que são mais valorizadas pelo mesmo grupo, como por exemplo o tempo de entrega e a quantidade. Caso a customização do produto seja de fato um critério de valor, é preciso identificar quais são as

características que, do ponto de vista dos consumidores, valem a pena serem customizadas (PINE II, VICTOR e BOYNTON, 1993; HART, 1995; GILMORE e B. JOSEPH, 1997; ZIPKIN, 2001; SALVADOR, HOLAN e PILLER, 2009; KOLAREVIC e DUARTE, 2019; PILLER, 2019).

Ainda que os critérios sejam identificados, um dos principais desafios apontado por grande parte dos autores é o processo de escolha (PINE II, VICTOR e BOYNTON, 1993; HART, 1995; FRANKE e PILLER, 2003; BLECKER e ABDELKAFI, 2006; TIIHONEN e FELFERNING, 2017; PILLER, 2019; ZHAO, MCLOUGHLIN, *et al.*, 2019). Isto significa que o consumidor pode se sentir desconfortável diante de um número muito grande de opções, podendo se sentir frustrado e desistir da compra. Dentre alguns motivos estão as limitações das capacidades cognitivas dos seres humanos, falta de familiaridade com o produto e falta de habilidades técnicas para fazer o juízo correto da melhor escolha para si mesmo (BLECKER e ABDELKAFI, 2006). No entanto, conforme apontado por Zhao *et al.* (2019), o outro extremo também pode ser ruim. Impor um número limitado demais de opções pode frustrar o consumidor que não sentir suas necessidades atendidas.

2.2.2 O valor da habitação

Desde o êxodo rural para as cidades provocado pela Revolução Industrial no século XIX, a questão habitacional se tornou um tema de extrema relevância dentro da Arquitetura (DUARTE, 2001).

Diante do sucesso da indústria automobilística no emprego da estratégia de produção em massa, no início do século XX, arquitetos como Le Corbusier, Walter Gropius e Buckminster Fuller, se propuseram a desenvolver soluções que empregassem métodos construtivos industriais baseados na lógica de padronização (BENROS e DUARTE, 2009; LARSEN, LINDHARD, *et al.*, 2019). O modelo de construção padronizada encontrou solo fértil para sua aplicação no período imediato após a Segunda Guerra Mundial devido à reconstrução dos países europeus e para atender as altas demandas habitacionais nos Estados Unidos durante a onda de casamentos em consequência da volta dos soldados americanos (BENROS e DUARTE, 2009). No contexto nacional, o intenso processo migratório para as cidades nas duas primeiras décadas do século XX levantaram questões relacionadas à habitação. No entanto, grande parte da preocupação do poder público nacional nesta

época estava voltada para o caráter sanitário das reformas urbanas e das chamadas “habitações higiênicas” (RUBIN e BOLFE, 2014). As iniciativas do estado para produzir habitações nesta época e regulamentar o mercado de locação eram praticamente nulas. Após a revolução de 1930, durante o governo Vargas, é reconhecido que o problema habitacional é uma questão do Estado (BONDUKI, 1994). Sendo assim, a segunda metade da década de quarenta é marcada pela produção de aproximadamente 140.000 unidades habitacionais produzidas pelo Estado. Nesta mesma época, começaram a ser propagados mais intensamente no Brasil os preceitos do Movimento Moderno, o que trouxe à tona a propagação das “[...]experiências europeias no campo habitacional” (RUBIN e BOLFE, 2014).

A partir da década de 1960, inicia-se um processo de decadência da popularidade do modelo padronizado e, seguindo as tendências da época, um aumento das demandas individuais na indústria AEC (BENROS e DUARTE, 2009). Junto a isso, há também uma percepção negativa por parte do público com relação aos métodos pré-fabricados de construção, que passam a ser associados à modelos habitacionais monótonos e de baixa qualidade (BENROS e DUARTE, 2009; LARSEN, LINDHARD, *et al.*, 2019). Podem ser citados dois eventos que ilustram e colaboram para este cenário. Primeiro, de acordo com Larsen et al. (2019), o colapso do edifício pré-fabricado Ronan Point, em Londres, em 1968, devido a uma explosão provocada por um vazamento de gás. O segundo, a demolição do conjunto habitacional de Pruitt-Igoe, em St. Louis, Missouri, em 1972, que segundo Nesbitt (2006) é “[...] reconhecida como o marco do fracasso de uma concepção modernista de habitação social”, após ser reprovado, vandalizado e negligenciado pelos seus próprios moradores.

Assim, diferentemente de outras indústrias que se moveram a partir de estratégias baseadas em sistemas mais modernos e industrializados de produção, o cenário atual da indústria AEC, e mais especificamente no setor habitacional encontra-se, de forma geral, fundamentado em práticas tradicionais de projeto e produção. (DUARTE, 2001; BENROS e DUARTE, 2009; AVALONE, CALEGARI e FETTERMANN, 2019). Segundo Duarte (2001), os empreendimentos habitacionais baseiam-se no desenvolvimento de um número limitado de tipologias de acordo com informações de entrada retiradas de análises de mercado e tem sua produção a partir de métodos tradicionais de construção. Duas décadas depois, os apontamentos permanecem atuais. Duarte (2001) apresenta dois motivos para isso: (1) Em grandes

empreendimentos, devido ao grande número de informações a serem processadas, foge da capacidade dos arquitetos o desenvolvimento de soluções únicas para cada unidade habitacional. (2) Métodos de construção tradicionais baseiam-se na repetição dos processos para reduzirem os custos totais da obra. Além disso, a cadeia de suprimentos na construção civil é muito fragmentada e os modelos contratuais reduzem o nível de colaboração e inovação (LARSEN, LINDHARD, *et al.*, 2019). Especificamente no Brasil, segundo Avalone, Calegari e Fettermann (2019), conforme dados da Câmara Brasileira da Indústria da Construção (2016), no Brasil, 82% das empresas de engenharia e construção trabalham com menos de 10 funcionários.

Sendo assim, pode ser observado que a provisão de habitações na indústria AEC baseia-se em um modelo conservador com soluções padronizadas e métodos tradicionais de construção baseados na repetição dos componentes e tarefas de execução, e conseqüentemente das unidades, para redução de custos. No entanto, este modelo comprovadamente não atende às demandas individuais dos moradores (TAUBE e HIROTA, 2017). Este cenário gera problemas que vão da escala do indivíduo até a escala urbana. A falta de qualidade das habitações, em termos de adequação do projeto às necessidades dos usuários, coloca em risco a qualidade de vida dessas famílias (DUARTE, 2001; TAUBE e HIROTA, 2017). Conseqüentemente, a não adequação do projeto acarreta a insatisfação dos usuários, o que promove o ajuste do projeto a partir da autoconstrução, ou uma baixa taxa de retenção dos imóveis. Os dois casos induzem à depreciação e desvalorização de todo o conjunto habitacional (TAUBE e HIROTA, 2017; AVALONE e FETTERMANN, 2020). Estes problemas indicam que a CM poderia ser uma estratégia relevante para este setor.

2.2.3 Relevância da customização em massa para a provisão de habitações

Conforme visto anteriormente, o primeiro desafio da CM é verificar se a oferta de um determinado produto customizado é de fato valorizada pelos seus consumidores. Sendo assim, no caso do mercado habitacional, diversos estudos apontam que junto com o preço da habitação, o grau de adequação do projeto às necessidades do usuário é visto como um dos principais critérios de valor para aqueles que irão adquirir uma residência (NIELSEN, BRUNOE, *et al.*, 2016; FETTERMANN, TORTORELLA e TABOADA, 2019; TAUBE e HIROTA, 2017; AVALONE e FETTERMANN, 2020; LARSEN, LINDHARD, *et al.*, 2019). A CM permite a criação de

valor justamente a partir do atendimento as demandas específicas dos usuários com a manutenção do preço do mercado de massa, o que torna uma estratégia particularmente adequada ao mercado habitacional. Tratando-se de conjuntos de interesse social, essa estratégia torna-se mais relevante, uma vez que há um mercado de massa a ser atingido (BRANDÃO, PAIO e WHITELAW, 2017). De fato, o setor habitacional é o setor da indústria AEC que mais requer customização e ainda assim é o setor mais comoditizado (KOLAREVIC, 2019). Ainda, caso sejam utilizados sistemas pré-fabricados modulares para a materialização dos projetos, podem ser geradas reduções no custo total da obra (LARSEN, LINDHARD, *et al.*, 2019).

Segundo Taube e Hirota (2017), no Japão durante a década de 1990, a falta de áreas urbanas e as necessidades dos usuários levaram empresas de construção de habitações a recorrerem a uma estratégia de CM utilizando habitações pré-fabricadas para desenvolver produtos diferenciados que atendessem às demandas dos usuários. A estratégia acarretou a redução de custos e permitiu que os usuários pudessem adequar os projetos às suas necessidades.

Logo, é possível inferir que a CM possui relevância econômica para a provisão de habitações. Além disso, é possível argumentar que a estratégia também apresenta relevância do ponto de vista social já que ao incluí-la em conjunto com ações sociais, é possível projetar habitações adequadas a uma parcela maior e mais vulnerável da população, contribuindo para a construção de cidades mais heterogêneas e representativas (KOLAREVIC e DUARTE, 2019).

2.2.4 Desafios específicos

Apesar da CM apresentar justificativa e relevância para o setor habitacional, ainda é uma estratégia que exige reformulação de processos da cadeia de produção da indústria AEC. Sendo assim, um dos primeiros desafios para a CM de habitações é o confronto dessa necessidade de alterações com características de caráter mais conservador próprias da indústria AEC (AVALONE, CALEGARI e FETTERMANN, 2019; LARSEN, LINDHARD, *et al.*, 2019). Ademais, conforme Kolarevic e Duarte (2019) apontam, existe uma barreira de cunho sociocultural que está relacionada ao quanto o usuário final está disposto a se arriscar em co-desenhar a edificação.

Além destes fatores, existem questões específicas indissociáveis da natureza da indústria AEC, fundamentadas nas características do produto e no processo de

produção (PIROOZFAR e LARSEN, 2009), que geram dificuldades específicas e juntam-se aos desafios vistos anteriormente. A seguir são apresentados alguns destes fatores, adaptados e sintetizados de Piroozfar e Larsen (2009).

- a) **Tamanho do produto:** na indústria AEC o produto é bem maior tanto pelas suas dimensões absolutas, como na comparação da dimensão final com os itens que o compõem, em comparação com outras indústrias (exceto a aeroespacial e naval);
- b) **Relação proporcional/dimensional com o consumidor:** O usuário está ao mesmo tempo inscrito no edifício, localizado dentro dele e circunscrito, ou seja, age sobre o edifício. Assim, o processo de percepção do produto por parte do usuário ocorre a partir do seu uso interno e do seu exterior, o que torna demasiadamente difícil uma percepção completa do objeto antes de utilizá-lo. Isso coloca em risco diretamente a capacidade de customização no processo de projeto e produção das edificações;
- c) **Mobilidade:** As edificações, exceto em casos raros, são por natureza produtos que não apresentam mobilidades (imóveis), enquanto em outras indústrias, a grande maioria dos produtos são projetados para serem movidos. Essa característica o torna um produto dependente do contexto em que se insere. De tal maneira, enquanto outros produtos podem ser produzidos globalmente e utilizados globalmente, na indústria AEC a produção e o uso são regionais ou idealmente locais;
- d) **A noção de variedade:** O conceito de variedade na construção difere-se de outras indústrias por dois pontos: (1) a linearidade dos processos na produção de habitação dificulta a sua reorganização em subprocessos não lineares, o que torna a implementação de variedade mais complicada; (2) quase todo aspecto que pode ser alterado em uma edificação, do ponto de vista do consumidor, envolve os aspectos construtivos. Diferentemente de outras indústrias, que para atingirem a percepção de customização por parte do consumidor, não envolvem alterações na infraestrutura do produto, como na customização de um computador ou um carro, por exemplo. Logo, a percepção de variação em edificações é mais difícil de ser atingida;

- e) **Tempo de vida útil e ciclo de vida do produto:** O tempo de vida útil e o ciclo de vida (o processo de aquisição de material prima até a reciclagem dos materiais utilizados) de um produto influencia a sua customização. Se um produto é projetado para durar e ser útil por bastante tempo, existe a necessidade de reparação, reconstrução, reabilitação e reconfiguração, baseado nas mudanças naturais das necessidades e preferências do seu usuário ao longo do tempo. Por isso, a natureza da customização de uma bicicleta e de uma casa são totalmente diferentes. Quanto maior o tempo de vida e o ciclo de vida do produto, mas complicado e mais crítico será a sua customização;
- f) **Custo:** Em termos econômicos, tanto os investimentos quanto os retornos, assim como os termos de rotatividade, diferenciam-se em empreendimentos construtivos das outras indústrias. A indústria AEC é bem mais segura, no entanto, mais conservadora do que outra, como por exemplo a automobilística e computacional que correm mais riscos, mas são mais flexíveis às demandas do mercado, taxa de inflação e flutuações do capital financeiro;
- g) **Economia de escala.** A indústria da construção, em termos de produto de fato, nunca implementou a produção em massa de forma bem-sucedida. Além disso, o mercado AEC é mais fragmentado, diferentemente de outras indústrias, o que também dificulta a implementação da CM, por ser uma transição mais abrupta;
- h) **Necessidades e expectativas dos usuários finais:** O espectro das necessidades e expectativas das edificações, mais especificamente no caso das habitações, é mais heterogêneo do que em outras indústrias. Ademais, o bem-estar deve ser providenciado pela edificação de forma subjetiva e objetiva, a partir de seu uso.
- i) **Primeiro proprietário vs. futuro proprietário:** Obviamente, não é erguido um novo edifício com um novo projeto todas as vezes que há um novo consumidor. Assim, a revenda para novos proprietários, é um aspecto particular de algumas indústrias, dentre elas a da construção. O desafio

envolve possíveis adequações do edifício durante todo o seu período de vida, uma vez que os valores dos novos proprietários não necessariamente são os mesmos dos antigos.

- j) **Cadeia de suprimentos e sequência do pedido:** Produtos industriais geralmente possuem em seus projetos alguns componentes, como um chassi ou plataforma, que são compartilhados por outros produtos e que são irrelevantes do ponto de vista do consumidor. Nestes casos, a customização ocorre nos componentes específicos. Por outro lado, as edificações são desenhadas e construídas em sua totalidade após a compra. Essa característica intrínseca das edificações, inclusive faz parte do seu insucesso na produção em massa. De tal maneira, o processo de reorganização da cadeia de suprimentos na indústria AEC para a CM se torna mais complexo, novamente porque essa transição ocorre de um produto artesanal para um produto customizado em massa. Nas demais indústrias os produtos já são produzidos em massa e já possuem uma cadeia de suprimentos que atende essa lógica.

Conforme observado, existem muitos desafios relacionados à produção e ao uso na CM de habitações. Muitos residem na falta de controle sobre a cadeia de suprimentos e custos de produção, do tempo de via útil da habitação e da forma como o usuário interage em sua totalidade de dentro para fora da edificação. Conforme apontam Avalone, Calegari e Fettermann (2019), o processo de produção do setor é fragmentado, baseado em modo de produção linear, hierárquico e controle descentralizado. Esse panorama dificulta a implantação da estratégia, uma vez que a CM depende que os processos de produção e logística envolvidos sejam flexíveis, porém estáveis (PILLER, 2019).

Dados este cenário, interessa ao campo das disciplinas de projeto indagar de que maneira estas questões relacionadas ao uso e produção podem ser rebatidas e previstas a partir da ótica do projeto e do gerenciamento. Mais especificamente, no que diz respeito ao campo da arquitetura, é preciso indagar se os métodos lineares de projeto e mídias de auxílio tradicionais são adequados e suficientes para responder às necessidades de integração dos agentes da cadeia e velocidade na resolução de problemas.

2.3 Building Information Modeling e modelagem algorítmica-paramétrica

Esta pesquisa parte da premissa inicial de que existem duas tecnologias capazes de promover melhorias no processo de projeto, a fim de promover o potencial da CM de habitações de interesse social. Primeiro, o *Building Information Modeling* (BIM), uma vez que a modelagem de dados da construção pode antecipar perdas, otimizar a colaboração entre profissionais e permitir o maior controle orçamentário e de prazos. A partir da modelagem paramétrica e da interoperabilidade inerentes ao BIM é possível compatibilizar diferentes disciplinas em tempo real, controlar os custos, facilitar o gerenciamento de outras equipes envolvidas na construção e simular o desempenho do edifício durante todo o seu ciclo de vida, além de outras vantagens. Segundo, a modelagem algorítmico-paramétrica, capaz de promover alta variabilidade de projeto, em larga escala e de forma instantânea, dentro de uma mesma lógica de projeto e produção.

Este capítulo tem como objetivo apresentar brevemente as definições conceituais de BIM e modelagem algorítmico-paramétrica com base em autores e estudos relevantes sobre estes temas e apresentar uma revisão de literatura com o intuito de levantar o estado-da-arte sobre o uso do BIM para a CM de habitações, avaliando se o escopo das pesquisas publicadas indica aplicações das vantagens apresentadas. Espera-se que a partir da análise do estado-da-arte, seja possível identificar oportunidades para a exploração da prática.

2.3.1 Building information modeling

De acordo com Andrade e Ruschel (2011), as bases para a definição do Building Information Modeling (BIM) são os princípios de coordenação, colaboração e interoperabilidade. Com isso estabelecido, a definição do BIM ocorre a partir de três abordagens que se sobrepõem. São estas: ferramenta, tecnologia e processos.

O BIM como ferramenta refere-se à aplicativos computacionais para produção e documentação do edifício. Da perspectiva tecnológica diz respeito à possibilidade do processamento e uso da informação a partir de um banco de dados para as atividades de documentação do projeto e simulação da construção e operação do edifício. Por fim, enquanto metodologia, é uma abordagem de gerenciamento das informações do edifício a partir de um modelo digital único, que visa a colaboração, coordenação, integração, simulação e otimização do projeto, construção e operação do edifício durante seu ciclo de vida (ANDRADE e RUSCHEL, 2011).

Sendo assim, segundo Andrade e Ruschel (2011), para que o BIM seja utilizado em sua plena potência, ou seja, como ferramenta, tecnologia e metodologia, requer uma mudança no processo de projeto, construção e gerenciamento de todo o ciclo de vida do edifício, baseado na coordenação integrada, na interoperabilidade e no compartilhamento e reuso de informações.

2.3.1.1 Modelagem paramétrica e interoperabilidade

Segundo Eastman et al (ANDRADE e RUSCHEL, 2011) o BIM se apoia em duas tecnologias, a modelagem paramétrica e a interoperabilidade. A modelagem paramétrica é a construção de um modelo geométrico a partir da definição de atributos fixos e variáveis. A manipulação dos atributos variáveis, também chamados de parâmetros, implica em variações no modelo geométrico, cujos resultados compõem o espaço de soluções do projeto. Partindo desta tecnologia “o processo de busca de soluções de projeto passa a ser mais rápido e flexível” (ANDRADE e RUSCHEL, 2011).

A interoperabilidade refere-se à capacidade de comunicação de dados entre aplicativos sem necessidade de replicação de dados já gerados. Dessa forma, facilita-se o fluxo de informações entre diferentes disciplinas. De acordo com Andrade e Ruschel (2011), uma das vantagens da interoperabilidade é a possibilidade de

combinar informações dos diversos agentes da indústria AEC em um único modelo paramétrico do edifício. Por permitir a exportação de informações de diferentes disciplinas, em tempo real, o BIM permite diferentes tipos de análise durante todo o processo de projeto, desde a concepção inicial até as fases finais, tais como: quantitativos e custos da construção, análise de desempenho energético, estrutural e outros, e compatibilização entre as diferentes disciplinas.

Sendo assim, a modelagem paramétrica construída a partir da informação da construção com a interoperabilidade permite a comunicação, integração e participação de todos os agentes envolvidos de forma horizontal com atualização das informações em tempo real em um ambiente ideal para otimização do processo de projeto, construção e manutenção voltados ao desempenho das diversas esferas que compõem o ciclo de vida da edificação.

2.3.2 Modelo algorítmico-paramétrico

Esta seção tem como objetivo apresentar a definição formal de modelagem algoritmo-paramétrica adotada e justificar a escolha desse processo para a composição da plataforma proposta pelo presente trabalho.

2.3.2.1 Projeto paramétrico

De acordo com Kolarevic (2003) no projeto paramétrico “são os parâmetros de um projeto em particular que são declarados, e não suas formas.” Conforme Caetano, Santos e Leitão (2019), esta definição de Kolarevic é compartilhada por um número expressivo de autores. Baseado no estudo da evolução histórica do termo e na análise de diferentes definições, Caetano, Santos e Leitão (2019) propõem que o projeto paramétrico se trata de uma abordagem que descreve um projeto simbolicamente baseado no uso de parâmetros. Neste caso, a alteração dos valores dos parâmetros define instâncias de projeto. De acordo com os mesmos autores, o significado de projeto paramétrico também é associado com os termos modelo ou modelagem paramétrica e sistema paramétrico.

2.3.2.2 Projeto algorítmico

De acordo com o dicionário brasileiro Michaelis da Língua Portuguesa, algoritmo pode ser definido como o “conjunto de regras e operações e procedimentos, definidos e ordenados usados na solução de um problema, ou de classe de problemas, em um número finito de etapas.” (MICHAELIS, 2021).

Sendo assim, após estudo da evolução do uso do termo dentro do campo da Arquitetura, Caetano, Santos e Leitão (2019) definem que o projeto algorítmico é aquele que utiliza explicitamente um algoritmo para definição do projeto e que permite a rastreabilidade da relação entre as partes da solução gerada com as respectivas partes responsáveis do algoritmo.

2.3.2.3 Projeto algorítmico e paramétrico

Embora o projeto paramétrico seja baseado em uma lógica de pensamento algorítmica (CAETANO, SANTOS e LEITÃO, 2019), não necessariamente todo projeto paramétrico é ao mesmo tempo um projeto algorítmico, conforme definidos anteriormente. Caetano, Santos e Leitão (2019) citam que dentro dos processos BIM os objetos paramétricos, também conhecidos como famílias, geram instâncias baseadas na manipulação de parâmetros, porém, sem a necessidade explícita de manipulação do algoritmo e sem a possibilidade de rastreabilidade das relações. Sendo assim, neste caso o modelo é puramente paramétrico.

Por outro lado, caso um modelo seja baseado na manipulação de um algoritmo e possua a possibilidade de rastreabilidade das relações, mas não seja baseado na manipulação de parâmetros, este modelo não pode ser considerado paramétrico. Logo, é possível definir que o processo de projeto algorítmico-paramétrico é aquele que se baseia em um modelo paramétrico cujos parâmetros são acessados e manipulados a partir do manuseio de um algoritmo responsável por gerar a solução de projeto e que atende a condição de rastreabilidade. Este modelo é definido como modelo algorítmico-paramétrico.

2.3.3 Uso do BIM para a customização em massa: revisão de literatura

A seguir foi feita uma revisão bibliográfica que buscou identificar trabalhos que utilizem o BIM no processo de CM. Para isso, foram estruturadas as seguintes etapas, de acordo com Kitchenham (2004): definição do problema e objetivo; busca e identificação da bibliografia; definição e aplicação de critérios de inclusão e exclusão; coleta dos dados; análise dos dados.

A definição do problema e do objetivo identificou-se a necessidade de compreender como o BIM vem sendo utilizado na literatura científica para viabilização da CM de habitações. Sendo assim, este trabalho busca (1) averiguar o estado-da-arte sobre a relação do BIM com a CM de habitações e (2) compreender oportunidades de pesquisa sobre o tema.

Na busca e identificação da bibliografia a pesquisa baseou-se no resultado de artigos publicados em periódicos e anais de eventos indexados nas bases de dados listadas na Tabela 2. A combinação de palavras-chaves para a busca se encontra na mesma tabela. Em seguida, os artigos encontrados na busca passaram por duas seleções. Na primeira seleção foram identificados artigos possivelmente relevantes para a pesquisa. Foram utilizados os seguintes filtros para esta primeira seleção: análise do alinhamento do título e do resumo do artigo com o tema pesquisado; trabalhos publicados entre 2010 e 2021; trabalhos revisados por pares. A segunda e última seleção definiu o escopo final dos artigos que iriam compor a revisão. Foram eliminados artigos duplicados e artigos cujo conteúdo não estava alinhado com o tema pesquisado. Ao final do processo restaram 15 artigos.

A coleta dos dados: A coleta dos dados foi realizada a partir do registro dos artigos e seus respectivos dados com o auxílio do software Microsoft Excel®. Finalmente a análise dos dados: A análise ocorre em duas fases. Inicialmente, a análise descritiva da bibliografia levantada, com classificação por ano, local de publicação e classificação do uso do BIM para CM de habitações. Em seguida, a análise qualitativa da contribuição da bibliografia levantada.

2.3.3.1 Categorias e critérios para classificação do uso do BIM

Para classificar o uso do BIM no processo de CM de habitações utilizam-se três categorias: (1) o papel do BIM no design, na produção ou integração entre ambos,

conforme interpretação dos sistemas de customização descritos por Duarte (2019); (2) o uso do BIM como ferramenta, tecnologia ou metodologia conforme descrito por Andrade e Ruschel (2011); (3) o uso do BIM de forma isolada ou integrado com outras tecnologias, tais como tecnologias de produção inovadoras ou rotinas de processos de projeto, objetivando a CM. Na primeira categoria a classificação em um sistema não exclui o outro. Na segunda e terceira categorias, a escolha de um uso específico exclui o outro.

Para enquadrar o BIM dentro dos sistemas de Duarte (2019), são adotados os seguintes critérios: Considera-se o BIM parte integrante do sistema de projeto quando este é utilizado no processo de tomada de decisão. Para o sistema de produção, quando é utilizado diretamente de alguma forma durante o processo de produção e execução, como por exemplo, como ferramenta para o gerenciamento e fiscalização da obra. Por fim, quando o BIM integrar os dois sistemas anteriores (projeto e produção), é classificado como integração.

A classificação do uso do BIM como ferramenta, tecnologia ou metodologia considera os seguintes critérios: Para ser classificado somente como ferramenta, o uso do BIM é restrito ao papel de visualizador de soluções e geração de documentação. Considera-se como tecnologia, quando for utilizado para visualização, acesso e controle dos dados da construção durante o processo de CM. Finalmente, é classificado como metodologia, quando desempenha papel central no processo de CM para integração de todos os agentes envolvidos, a partir de um modelo único e durante mais de uma etapa.

Também, é importante ressaltar que dois dos 15 trabalhos selecionados, os artigos de Lee et al. (2017) e Mostafa et al. (2018) não descrevem sistema específicos, mas tratam conceitualmente dos potenciais usos do BIM no processo de CM de habitações. Logo, estes dois artigos não foram considerados nesta classificação.

Tabela 2: Levantamento bibliográfico.

| Bases | Palavras-chave | | | | R | Sel 01 | Sel 02 | |
|----------------|--------------------------|-------------|-------------------------------|-------------|-----------------|--------|--------|----|
| Web of science | Customização em massa OR | A N D | BIM OR | A N D | Habitação OR | 13 | 12 | 10 |
| Scielo | Mass customization OR | | Building information modeling | | Rresidential OR | 2 | 0 | 0 |
| Scopus | Mass customisation | | Housing | | 91 | 14 | 3 | |
| Cumincad | | | | | 9 | 8 | 2 | |
| Total | | | | | 115 | 34 | 15 | |

2.3.3.2 Resultados

2.3.3.2.1 Análise descritiva

Foram analisados trabalhos publicados em 10 periódicos ou anais de eventos diferentes, dentre os quais *Automation in Construction* concentra o maior número de publicações. A pesquisa limitou-se à busca de resultados nos últimos 10 anos. A tabela com os trabalhos analisados e seus respectivos resultados para cada critério encontra-se no Apêndice A do presente trabalho.

Onze dos treze sistemas analisados tratavam o uso do BIM como um sistema de projeto voltado para a CM de habitações a partir de uma abordagem experimental, seja ele com ou sem o uso da plataforma BIM para gerar a interface com o usuário. Destes onze sistemas, seis deles propunham o uso do BIM como parte integrante de um sistema voltado para CM de habitações de forma conjunta com outras tecnologias computacionais ou construtivas.

Ressalta-se que dos trabalhos analisados que tratavam do uso do BIM de forma isolada, três deles são resultados de momentos diferentes de um mesmo sistema. Sendo assim, é possível considerar que apenas três dos sistemas propostos para a CM de habitações utilizavam o BIM de forma isolada para automatização do processo de projeto, sendo estes os trabalhos apresentados por Veliz, Medjdoub e Kocaturk (2011), Lee e Há (2013), Khalili-araghi e Kolarevic (2016a, 2016b, 2019).

Sete trabalhos utilizaram o BIM como integração e somente um dos trabalhos almejava utilizar o BIM para controle da execução, embora em uma fase posterior que não veio a ser concluída. Destaca-se que somente dois dos treze trabalhos utilizou o BIM exclusivamente como sistema de comunicação entre projeto e produção.

2.3.3.2.2 Análise qualitativa

Benros et al. (2011) apresentam parcialmente um sistema para CM de habitações e o processo de criação da linguagem projetual. Neste caso, o sistema o BIM tem o papel de integrar o projeto e a produção, conforme definidos por Duarte (2019).

Veliz, Mendjdoub e Kocaturk (2011) apresentam um modelo para customização de layouts de habitação dentro de uma plataforma BIM. O modelo baseia-se na modelagem paramétrica e no uso de restrições a partir do uso de macros dentro da própria plataforma. No entanto, não apresenta todas as etapas do processo BIM, pois não aborda o controle de custos, questões de desempenho ou simulação das fases da construção.

Jieru (2012) apresenta um modelo para gerenciamento de projeto de construções de habitações com sistemas pré-fabricados. Apesar do modelo basear-se no uso do BIM e de conceitos associados à CM, o autor apresenta apenas um modelo de gerenciamento de projeto, baseado em conceitos da CM, que utiliza o BIM com plataforma para desenvolvimento do desenho da habitação e para comunicação entre os agentes. Ademais, também fornece previsões de custos relacionadas à construção e à operação do edifício pós-ocupação. O trabalho apresenta contribuições conceituais para o gerenciamento de projetos habitacionais customizados, utilizando o BIM, apesar do modelo de gerenciamento estar associado apenas à sistemas pré-fabricados.

No trabalho de Lee e Há (2013), exhibe-se o processo e resultados de uso da plataforma BIM, utilizando um modelo paramétrico associado com restrições para manipulação do layout de um apartamento por diferentes grupos familiares com a ajuda de um arquiteto. O estudo resultou na satisfação dos usuários, com alta aceitabilidade de diferentes faixas-etárias, redução da necessidade de desenhos e percepção de valor e alta demanda por customização. Os resultados indicam que o BIM enquanto ferramenta também constitui uma interface de comunicação com o

usuário final. No entanto, é importante considerar o contexto cultural e social do experimento, realizado na Coreia do Sul, em um empreendimento de alto padrão com grande parte dos usuários habituados ao uso de computadores. No entanto, é importante relativizar a aceitação em um contexto em que a CM tem como alvo usuários com pouca experiência em informática.

Mohamed, Gemme e Sprecher (2016) apresentam uma plataforma integrada para a CM de habitações. Neste trabalho o BIM possui um papel central na interoperabilidade entre os subsistemas de análise estrutural e compatibilização que fazem parte desta plataforma. Além disso, o BIM é responsável por ser o ambiente de desenvolvimento e validação do projeto, providenciar informações de custo e documentação para a prototipagem. A pesquisa demonstra a possibilidade de uma estratégia para controle de custos a partir do BIM, no entanto depende de habilidades mais avançadas de programação por parte dos criadores do sistema. A plataforma é voltada para um sistema construtivo específico e com baixa adesão.

Khalili-Araghi e Kolarevic (2016a,2016b, 2019) apresentam um sistema baseado em restrições para CM dimensional que utiliza um aplicativo BIM como plataforma de projeto e comunicação com o usuário. Destaca-se por explorar os potenciais de modelagem paramétrica, visualização e documentação para desenvolver um sistema de customização inteiramente dentro de uma plataforma BIM de forma independente de sistemas externos. O trabalho discute porque o BIM como metodologia, tecnologia e plataforma é adequado para a CM. Primeiro, como a CM depende da interação entre usuário, projetista e fabricante, o BIM enquanto plataforma oferece um ambiente propício para essa comunicação. Segundo, a modelagem paramétrica associada às regras e restrições possíveis de serem implementadas dentro do BIM oferecem a possibilidade de variabilidade da solução com manutenção da viabilidade de execução e regularização do projeto. A pesquisa expõe como ocorre o processo de projeto para a CM em BIM ao demonstrar como decisões projetuais consideram as funções internas do software adotado como plataforma para abrigar este sistema. No entanto, segundo os próprios autores, a total dependência de um aplicativo específico deixa o sistema sujeito às suas limitações. Adiciona-se também que o sistema não é capaz de gerar variações topológicas.

Puusepp, Looke e Kivi (2017) comparam um modelo BIM e um modelo algorítmico-paramétrico para ser implementado em um aplicativo web como opção de

solução para a interface com o usuário. Os autores optaram pelo uso do modelo algorítmico-paramétrico por ser uma opção mais simples para o contexto do aplicativo web. No entanto, apesar dos autores optarem pelo modelo paramétrico em aplicativo web, eles destacam o BIM como um processo mais eficiente para esse processo de projeto.

Lee et al. (2017) definem formalmente, a partir de pesquisa-ação, três aspectos possibilitados pelo BIM que tornam a CM de habitações mais tangível: visualização das opções de projeto; informação paramétrica dos produtos; modelagem n-dimensional. Traz importante contribuição para a associação da CM e BIM, relacionando-o de forma explícita como tecnologia e metodologia.

Gazel et al. (2018) apresentam parcialmente um sistema para CM de habitações e o processo de design para a criação da linguagem projetual. Neste sistema o BIM tem como papel o detalhamento do design gerado em ambiente algorítmico-paramétrico para controle de custos, previsão de fases e simulação de conforto ambiental. Embora a fase do trabalho detalhada no artigo não englobe o uso do BIM, o artigo apresenta argumentos que advogam seu uso na CM de habitações de interesse social no contexto nacional. Segundo os autores, a estratégia nacional de disseminação do BIM por parte do Governo Federal estimula o uso do BIM no setor público. Logo, a disseminação do uso do BIM associada a processos generativos de projeto têm potencial para alterar o modelo atual de provisão habitacional baseado na padronização e na habitação mínima (GAZEL, MARTINEZ, *et al.*, 2018).

Veloso, Celani e Scheeren (2018) apresentam um sistema de projetos completo para CM de apartamentos. O trabalho possui como principal foco o desenvolvimento do sistema e a explicação de suas partes. Neste contexto, o BIM é parte deste sistema e tem como principal função gerar a documentação e a estimativa de custos do projeto, embora os resultados da estimativa não sejam detalhados.

Mostafa et al. (2018) apresentam, com base em revisão de literatura e entrevistas, a CM dentre os potenciais e barreiras do uso do BIM integrado à sistemas construtivos pré-fabricados. Dentre os argumentos favoráveis à associação do BIM à CM apontam a possibilidade do uso de restrições associadas ao modelo paramétrico, o que reforça o trabalho de Khalili-Araghi e Kolarevic (2016a,2016b, 2019).

Bianconi, Filippucci e Buffi (2019) apresentam um sistema generativo de soluções projetuais baseado em uma série de critérios de performance, voltado para

a CM. Os autores descrevem a CM como uma estratégia que se divide entre estratégia computacional e estratégia de integração, onde, na segunda, o BIM possui um importante papel ao colocar todos os agentes envolvidos no processo dentro de uma mesma linguagem de troca de informações. No entanto, neste caso, o BIM não é visto de forma independente de outros conceitos, como por exemplo, o design generativo e algorítmico-paramétrico e a pré-fabricação, considerados essenciais pelos autores para que a CM ocorra.

Yazdi, Fini, Forsythe (2020) exibem o resultado de um sistema para customização de habitações que tem como foco a estabilidade do processo de projeto e a integração precoce dos agentes que compõem a cadeia de suprimentos. Nesse caso, o BIM possui papel central na integração dos agentes, na introdução das restrições de cada área no modelo desenvolvido pela equipe de design e interface com o usuário.

2.3.3.3 Discussões

Os resultados revelam que a maioria das publicações sobre o tema encontram-se em revistas ou anais de eventos que têm como foco investigar o uso de tecnologias digitais para auxílio dos processos envolvidos na construção civil, como projeto, gerenciamento e manutenção dos edifícios. Observa-se que este é um tema de relevância contemporânea, com a maioria das pesquisas (73,33%) concentradas nos últimos 4 anos.

É possível observar que todas as pesquisas destacam o papel do BIM na integração dos diversos agentes da indústria AEC como favorável ao processo de CM de habitações. Além disso, o poder de geração automatizada da documentação do projeto é largamente percebido como uma vantagem. O perfil da maioria das pesquisas revela um empenho dos pesquisadores em desenvolver um modelo de automatização de alguns processos projetuais para viabilizar a CM de habitações, no qual o BIM faz parte de um sistema ou possui o papel central.

A maioria também destaca as qualidades relacionadas ao controle de custos, planejamento e simulação de desempenho, embora um número pequeno das pesquisas analisadas aprofunda ou demonstra com detalhes como estes pontos são abordados. Não existem resultados concretos que demonstrem o controle orçamentário dos projetos customizados com o uso do BIM e o comparem com os

custos de uma habitação padronizada tradicional. O BIM enquanto plataforma é apresentado como um ambiente útil para a interface com o usuário, ainda que com limitações e com a necessidade de acompanhamento de um profissional. Ainda assim, a possibilidade de visualização tridimensional em tempo real das alterações projetuais, associado à visualização de custos, facilita a comunicação e o poder de escolha do usuário final.

De maneira geral, é possível perceber que embora o BIM tenha grande potencial na viabilização da CM de habitações, esse é um tema ainda pouco explorado frente as pesquisas de BIM em outros contextos. A maioria das pesquisas possuem como foco o desenvolvimento de sistemas, sem o aprofundamento em um modelo de controle de custos de obra, consumo energético e acompanhamento pós-ocupação e outras questões. Finalmente, ressalta-se que a análise e os resultados apresentados estão limitados aos conteúdos disponíveis nas bases de dados adotadas na data em que o presente trabalho é escrito.

2.3.3.4 Considerações finais da revisão

Esta seção teve como objetivo o levantamento do estado-da-arte das pesquisas relacionadas ao uso do BIM para CM de habitações. A revisão de literatura permitiu identificar que o tema vem ganhando atenção nos últimos quatro anos. Dentre as publicações apresentadas, o uso do BIM como metodologia e como parte integrante do sistema de projeto conforme descrito por Duarte (2019) destaca-se como a categoria de maior interesse dos pesquisadores. É possível concluir que ainda existem muitas lacunas na associação do processo de CM e o BIM: aprofundamento e detalhamento do controle de custos de habitações customizadas a partir do BIM; simulações de desempenho de todo o ciclo de vida da habitação customizada e suas implicações no custo final; gerenciamento de projeto voltado para a CM de habitações a partir da metodologia BIM; variabilidade das unidades de habitação em ambiente BIM; interface com o usuário a partir do BIM em conjunto com ambientes de realidade virtual para captar as decisões dos futuros moradores e etc.. Finalmente, como trabalhos futuros recomenda-se ampliar a consulta em outras plataformas de pesquisa e adicionar novas palavras-chave para aprimorar os resultados.

3 DESCRIÇÃO DOS PROCESSOS

Este capítulo tem como objetivo apresentar o conjunto de atividades desenvolvidas, de forma sistemática, para o cumprimento dos objetivos desta pesquisa. Sendo assim, será apresentado o desenvolvimento do sistema de CM como um todo. Em seguida, as etapas constituintes do processo de desenvolvimento são apresentadas em maiores detalhes separadamente. Primeiro, como foram levantadas as informações sobre o contexto de aplicação específico dessa pesquisa e sua relevância. Segundo, o desenvolvimento do universo de soluções possíveis, a partir da criação da linguagem arquitetônica, escolha dos seus componentes construtivos e lógica de projeto. Terceiro, o desenvolvimento do sistema de geração, capaz de criar instâncias do universo de soluções possíveis.

3.1 Subsistema de design de um sistema de customização em massa para habitações de interesse social

É apresentado na Figura 15 o grafo representando o sistema de design desenvolvido pela pesquisa. O objetivo desta representação é apresentar o funcionamento do sistema como um todo antes de apresentar suas partes.

- a) **Formulação:** A formulação do projeto ocorre a partir da interpretação das necessidades do usuário final, pelo próprio projetista, para conversão em um programa arquitetônica a ser atendido.
- b) **geração:** o subsistema de geração é baseado na integração entre o ambiente de modelagem algorítmico-paramétrico e o BIM e tem como objetivo auxiliar o projetista na tomada de decisão.
- c) **avaliação:** o sistema de design não possui um subsistema de avaliação, cabendo ao projetista avaliar a solução junto ao usuário final.
- d) **representação:** visualização 3D e 2D ocorre a partir das viewports dos programas Revit e Rhinoceros. Visualização dos dados referentes à áreas, custos e tempo de execução são disponibilizados em forma de gráficos na interface do usuário.

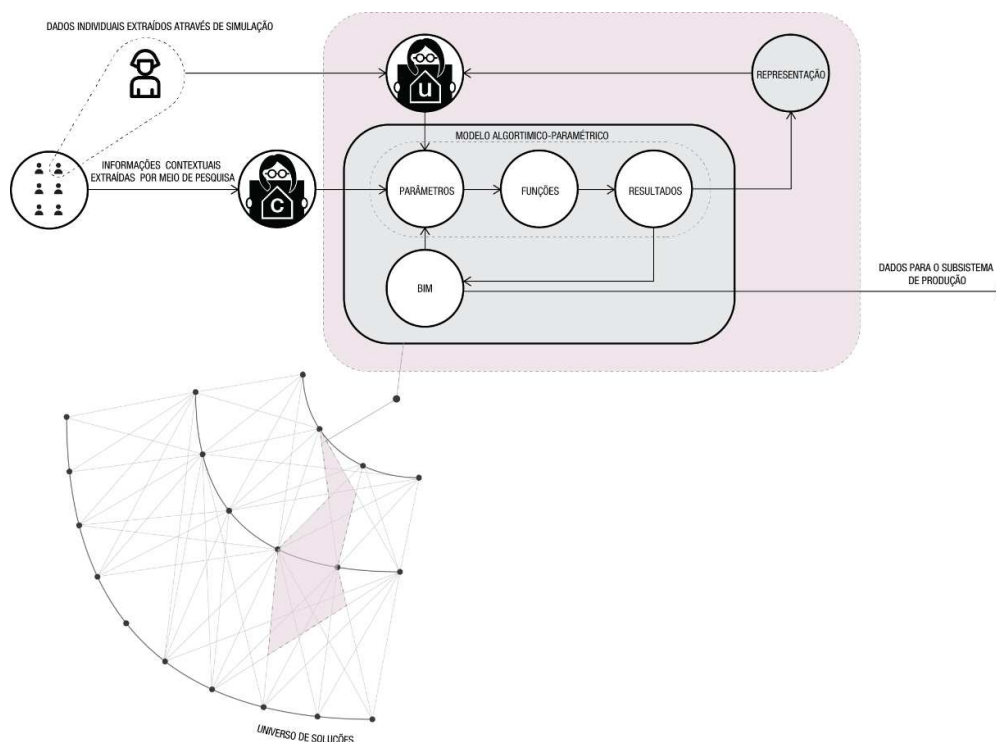


Figura 15: Grafo representando o subsistema de design desenvolvido pela pesquisa. Fonte: Autor.

A pesquisa focou no desenvolvimento de um sistema de design voltado para a CM de habitações de interesse social a partir da interação entre um modelo algorítmico-paramétrico e um modelo de dados da construção. No entanto, é importante ressaltar que não seria possível, ou no mínimo a pesquisa teria seus resultados prejudicados, se o sistema de design fosse pensado isoladamente sem considerar a origem das suas informações de entrada o destino das suas informações de saída.

Sendo assim, foi escolhido como contexto específico para a aplicação da pesquisa o conjunto habitacional Residencial Parque Brasil em Teresina – PI. Este conjunto foi construído para abrigar famílias afetadas pelo programa urbanístico Lagoas do Norte idealizado e realizado pela Prefeitura de Teresina, PI. Portanto, foram levantados dados demográficos dos potenciais moradores deste conjunto e dados das moradias de uma das regiões afetadas pelo programa a partir do relatório de reassentamento involuntário produzido pela Prefeitura de Teresina. Adicionalmente a estas informações foram levantados dados de projeto do conjunto habitacional, fornecidos pela Prefeitura de Teresina para essa pesquisa, e das

características socioculturais relacionadas às atividades, comportamentos e práticas construtivas oriundas da região a partir de pesquisa bibliográfica. Estas ações para levantamento de informações tiveram como objetivo suprir a falta de um subsistema de elicitação próprio e de contato com os usuários reais deste conjunto devido às limitações da pesquisa que não tinha como objetivo o aprofundamento e desenvolvimento deste subsistema.

A partir destas informações, foram desenvolvidos parâmetros para composição de perfis familiares. Estes parâmetros foram aplicados em uma plataforma de simulação aleatória desenvolvido em uma planilha utilizando o software Microsoft Excel. Partindo da combinação aleatória dos parâmetros, um perfil único era simulado e utilizado como dados de entrada das características do usuário final, convertido como informações de projeto pelo sistema de formulação, realizado de forma analógica pelo usuário do sistema de design. A descrição de cada parâmetro se encontra na Tabela 3.

Tabela 3: Definição dos parâmetros para geração das demandas. Fonte: Autor.

| | |
|---------------------------------|---|
| Perfil | Define o arranjo familiar. Chefe(s) da família, filhos, agregados e etc. |
| Idoso na residência ou PCD | Indica se há pelo menos um idoso ou pessoa com deficiência na residência. |
| Relação com a rua | Preferência da relação da residência com o entorno, com base em um perfil mais extrovertido ou introvertido da família. |
| Atividade remunerada na moradia | Indica se há a realização atividade remunerada na residência. Em caso de resposta positiva, há uma indicação de qual atividade é exercida. |
| Previsão do aumento da família | Indica se a família pretende expandir seus membros, no entanto, sem indicar como será a expansão (1 filho, receber um idoso, agregados, etc.) |

Tabela 4: Representação do sistema de geração de demandas aleatórias com exemplo de resultados. Fonte: Autor.

| Demandas | |
|--|--------------------|
| Perfil | casal com 1 filho |
| Idosos na residência? (Mais de 65 anos) | Não |
| Relação com a rua | Introvertido |
| Atividade remunerada na moradia? | Sim |
| Se sim, qual? | Delivery de comida |
| Pretende aumentar a família? | Não |

Após a formulação das necessidades dos usuários em necessidades de projetos, os parâmetros do algoritmo são manipulados pelo usuário dos sistemas: (1) os valores dos parâmetros dos elementos construtivos modelados no ambiente do Grasshopper são alimentados pelos objetos paramétricos oriundos do software Revit; (2) as etapas do algoritmo são processadas e um resultado é gerado conforme os valores são alterados; (3) como o sistema desenvolvido não possui um subsistema de avaliação nem de busca automatizado, os resultados parciais são analisados pelo próprio usuário do sistema, responsável por avaliar e definir a melhor opção a partir da visualização do subsistema de representação que exhibe o resultado geométrico, o custo, o tempo de execução e metragem da cobertura e da área construída; (4) as informações são então enviadas de volta para o software BIM onde um modelo central é gerado; (5) o modelo é enviado para o ambiente de realidade virtual do programa Twinmotion; (6) a partir deste ponto o modelo central pode ser utilizado para integração com outras disciplinas, e outros possíveis algoritmos oriundos destas e a documentação de projeto que será enviada para o subsistema de produção.

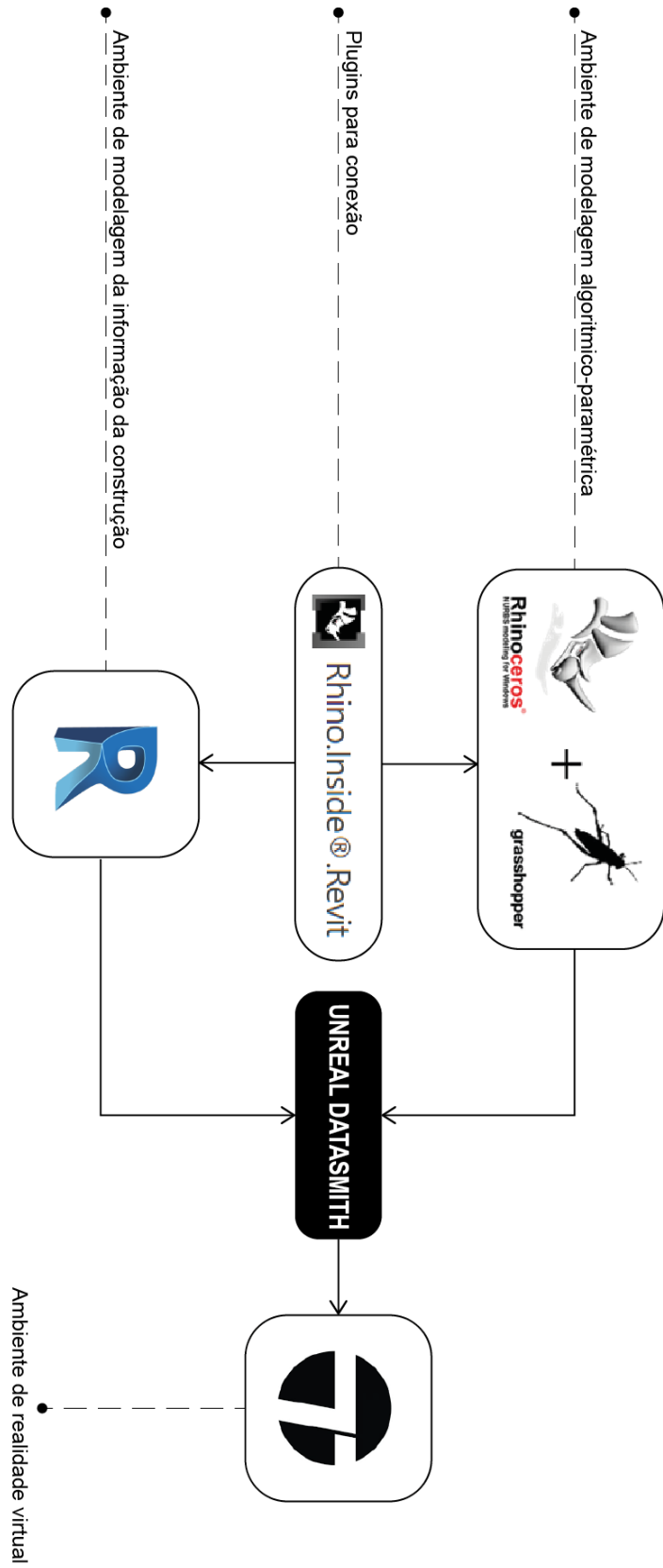


Figura 16: Diagrama de integração entre os diversos programas e plugins envolvidos no processo de customização em massa do presente trabalho. Fonte: Autor.

3.2 Levantamento das informações contextuais específicas de aplicação da pesquisa (elicitação)

Conforme visto anteriormente, é necessário identificar as características peculiares do grupo de possíveis usuários finais para o correto funcionamento do subsistema de design. Embora o escopo do presente trabalho não cubra o desenvolvimento de um subsistema de elicitação capaz de levantar com precisão tais informações, objetivando evitar soluções genéricas e recorrentes, optou-se por escolher um contexto específico real, a partir do qual poderiam ser extraídas informações contextuais específicas que pudessem alimentar o sistema de design para definição do seu universo de soluções possíveis.

Após a análise de alguns casos, foi escolhido o Residencial Parque Brasil na cidade de Teresina no Piauí. O projeto e execução deste conjunto é uma das ações do Programa Lagoas do Norte da Prefeitura Municipal de Teresina em conjunto com o Governo Federal e o Banco Mundial (BIRD). O Programa Lagoas do Norte tem como objetivo:

(...) a melhoria do quadro ambiental da cidade de Teresina em especial da região norte da cidade, e para alcançar este propósito realizará obras de (I) saneamento, (II) proteção contra cheias, (III) requalificação urbana, (IV) melhorias habitacionais e (V) gestão ambiental (PREFEITURA MUNICIPAL DE TERESINA, 2019a, p. 5).

Já o objetivo específico do núcleo habitacional é “suprir as demandas ocasionadas por reposição de moradias” (PREFEITURA MUNICIPAL DE TERESINA, 2019a, p. 80). Estas demandas são provenientes de diversas regiões afetadas, o que refletiu no tamanho e complexidade do conjunto que podem ser melhor compreendidos a partir dos dados do projeto compilados na Tabela 5.

Tabela 5: Dados compilados do Residencial Parque Brasil. Fontes: (PREFEITURA MUNICIPAL DE TERESINA, 2019a; PREFEITURA MUNICIPAL DE TERESINA, 2019b)

| | |
|-----------------------------------|----------------------------------|
| Área total do empreendimento | 252.833,85m ² |
| Nº total de unidades residenciais | 1.022 |
| Nº de lotes individuais | 350 |
| Residencial | 247 |
| Residencial / comercial | 103 |
| Nº de apartamentos | 672 |
| Orçamento total | R\$ 107.000.000,00 |
| Orçamento por unidade residencial | R\$ 108.000,00 |
| Sistema construtivo padrão | Placa de concreto pré-fabricadas |

Existem alguns motivos que justificam a escolha deste projeto. Primeiro, devido à escala, com total de 1022 unidades residenciais, o que justifica a aplicação de uma estratégia de CM. Também, por se tratar de um projeto já executado e finalizando recentemente (primeiro semestre de 2020), cujo produto existente pode ser comparado com o produto proposto. Além disso, a fim de compreender os perfis dos moradores, a Prefeitura de Teresina elaborou um relatório detalhado com o perfil dos usuários e das moradias da localidade. Estas informações demográficas permitiram compreender as semelhanças e diferenças dessas famílias que possuem uma composição altamente diversificada, o que também corrobora para a escolha desse caso.

Além disso, após análise inicial, percebeu-se que havia grande relação das atividades tradicionais locais com a forma de habitar o que poderia também ser explorado no desenvolvimento da linguagem projetual. Por fim, apesar dos esforços do poder público local para atender as diferentes demandas (projetos com metragem quadrada superior ao mínimo estipulado pelas cartilhas da Caixa Econômica Federal para habitações padrões e cartilhas com instruções para ampliações e previsão de espaços para atividade comercial em alguns lotes), pela própria natureza da estratégia da padronização em massa, os projetos não refletem a diversidade dos perfis dos usuários finais em termos de uso e sistema construtivo.



Figura 17: Unidades residenciais do Residencial Parque Brasil. Fonte: (PREFEITURA MUNICIPAL DE TERESINA, 2019b).



Figura 18: Mapa de implantação do loteamento Parque Brasil. Fonte: (PREFEITURA MUNICIPAL DE TERESINA, 2019a).

3.2.1 Perfil dos imóveis e das famílias afetadas

Foi escolhida uma das áreas afetadas pela requalificação do Programa Lagoas do Norte para levantamento dos perfis, o poligonal da Rua Manoel Aguiar Filho. Trata-se de um recorte com 119 imóveis e 147 famílias afetadas, o maior número entre todas as áreas afetadas. Na Tabela 6 são apresentados os dados compilados dos perfis das moradias e das famílias afetadas:

Tabela 6: Dados compilados do perfil dos imóveis e famílias afetadas no poligonal da Rua Manoel Aguiar Filho antes da construção do projeto em 2020. Fonte: (PREFEITURA MUNICIPAL DE TERESINA, 2019a)

| |
|--|
| Nos 119 imóveis abrangidos neste PRI, residem 147 famílias com uma população de 436 moradores; |
| 35% da população é composta por crianças e adolescente e, em 3 imóveis registrou-se a presença de idosos (maiores que 60anos); |
| 77% dos entrevistados (chefes de famílias) são mulheres; |
| 67% dos imóveis possuem moradores que trabalham; |
| 71% dos imóveis possuem renda familiar bruta inferior R\$1.000; |
| 69% dos imóveis são ocupados por até 4 moradores e, em 18% deles moram mais de uma família(coabitação); |
| 51% das famílias residem no local há 5 anos ou menos, e 2% há mais de 30anos; |
| 87% dos tem uso exclusivamente residencial e 92% são próprios; |
| 56% das edificações são inferiores a 60m ² e 43% apresentam padrão construtivo mínimo ou abaixo do mínimo; |
| 87% dos imóveis tiveram seus valores avaliados em até R\$65.000 – no ano de 2014; |
| 7% não possui coleta de resíduos sólidos domiciliares; |

3.2.2 Aspectos culturais e geográficos

De acordo com a Prefeitura Municipal de Teresina (2020), a cidade possui 1.392 km² de extensão e 830 mil habitantes. O desenho urbano do município segue um modelo típico do período colonial, semelhante a um tabuleiro de xadrez. De acordo com Oliveira e Lopes (2020), para fins administrativos, a cidade de Teresina é dividida em cinco regiões: Centro, Norte, Sul, Leste e Sudeste. Destas, a região Norte, foco do Programa Lagoas do Norte é a que apresenta maior vulnerabilidade socioambiental.

Ainda segundo a Prefeitura Municipal de Teresina (2020), a principal atividade econômica de Teresina é a prestação de serviços. No entanto, mais especificamente na região Norte, a principal atividade é a extração e beneficiamento da argila, também conhecida como atividade oleira (OLIVEIRA e LOPES, 2020). De acordo com Oliveira e Lopes (2020), a extração de argila, realizada há mais de 50 anos naquela região, foi a principal impulsionadora do povoamento no local. Dado este fato, é possível perceber que esta atividade reflete a cultura construtiva local, já que as residências são majoritariamente construídas de alvenarias de tijolo cerâmico a partir da autoconstrução.

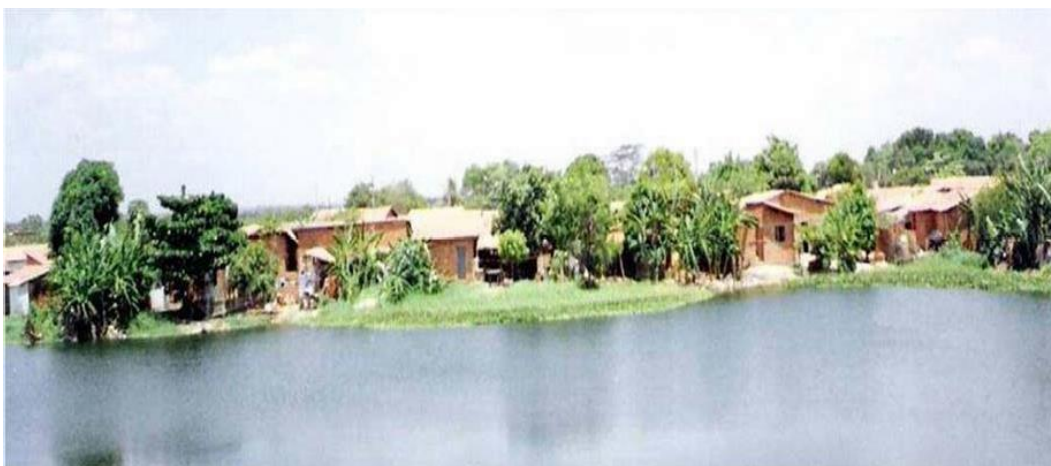


Figura 19: Aspectos Habitacionais – Área de intervenção do Programa Lagoas do Norte. Fonte: (PREFEITURA MUNICIPAL DE TERESINA, 2019a)



Figura 20: Aspectos Habitacionais – Área de intervenção do Programa Lagoas do Norte. Fonte: (PREFEITURA MUNICIPAL DE TERESINA, 2019a).

Também, foi feito um levantamento das fachadas dos imóveis da região afetada escolhida, antes da sua demolição a partir de imagens captadas pelo Google Maps, afim de compreender melhor o perfil construtivo destas residências. A Figura 21 mostra algumas das imagens coletadas. Foi possível constatar que as residências em sua totalidade eram casas térreas, cuja maioria eram construídas com alvenaria de tijolos cerâmicos, cobertura de telhas cerâmicas e estrutura da cobertura em madeira.



Figura 21: Fachada de parte das residências afetadas pelo Programa Lagoas dos Norte. Fonte: Autor a partir do site Google Maps.

Por fim, em relação ao clima local, Teresina apresenta clima tropical semiúmido com altas temperaturas e duas estações características: o período das chuvas (que ocorrem no verão e outono) e o período seco (que ocorre no inverno e primavera) (PREFEITURA MUNICIPAL DE TERESINA, 2020). Teresina possui temperatura máxima anual de 33,8°C, oscilando mensalmente de 31,8 °C a 37,1°C. A temperatura mínima anual é de 22,4°C com oscilações de 20,7°C a 23,8°C (MENEZES, MEDEIROS e SANTOS, 2016).

3.3 Desenvolvimento do universo de soluções possíveis

A primeira diretriz para o desenvolvimento das habitações foi o respeito as características do contexto específico. Isto foi atendido a partir da escolha do sistema construtivo de blocos cerâmicos, utilizando tijolos de argila, cuja técnica construtiva e materiais são disseminados localmente. Além disso, a autonomia dada aos usuários a partir desta escolha contribui para a expansão e adaptação das unidades a longo prazo.

No entanto, era importante que a execução fosse racionalizada para que, apesar da variabilidade das soluções, houvesse estabilidade do processo construtivo e, conseqüentemente, do custo. Essa racionalização foi adquirida a partir da modularidade da composição formal das habitações e dos componentes construtivos, que permite diversidade de combinação de elementos padronizados em diferentes esferas do projeto.

De acordo com Noguchi et al. (2016), essas esferas são classificadas como: volumetria, elementos externos e internos e elementos adicionais. O volume é o conjunto de componentes utilizados para definir os espaços da residência, determinando número, configuração e tamanho dos ambientes. Os elementos exteriores e interiores são componentes construtivos que possuem função decorativa e funcional, como por exemplo, telhados, esquadrias, varandas, compartimentos de armazenamento, acabamentos, vedações e etc. Os elementos adicionais são os componentes construtivos opcionais, como por exemplos, equipamentos elétricos, equipamentos hidráulicos e outras instalações (NOGUCHI, FORMOSO, *et al.*, 2016). Sendo assim, o nível de customização irá depender do grau de variabilidade oferecido em cada uma dessas esferas, de acordo com os recursos disponíveis e as necessidades e escolhas dos usuários finais.

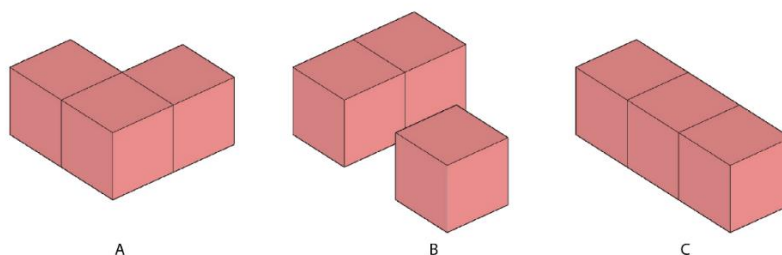


Figura 22: Combinação dos módulos para gerar variedade de volumetrias. Adaptado de Noguchi et al. (2016). Fonte: Autor.

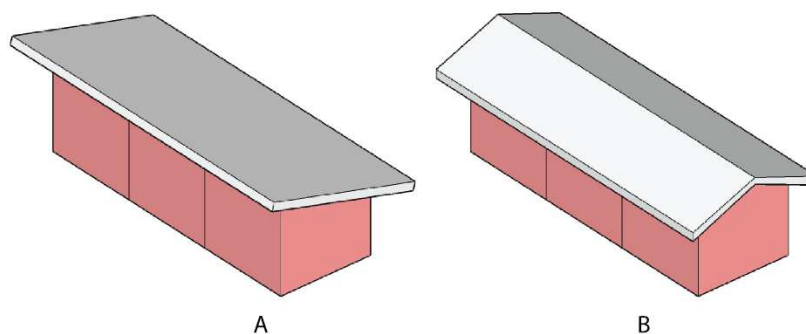


Figura 23: Variedade de um mesmo volume a partir da manipulação de um elemento externo. Adaptado de Noguchi et al. (2016). Fonte: Autor.

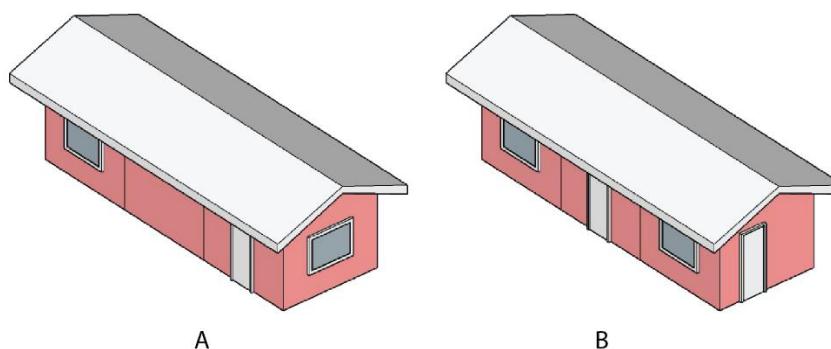


Figura 24: Outro nível de variedade concedido a uma mesma volumetria a partir da diferença de posicionamento das esquadrias. Fonte Autor.

De acordo com Brandão (2011), a flexibilidade contínua é a organização do projeto e dos espaços de forma compatível com os diferentes padrões de vidas decorrentes das mudanças na composição do núcleo familiar ao longo do seu ciclo de vida. Dito isso, é importante ressaltar que a flexibilidade aqui é tratada a partir do uso da planta livre e da possibilidade de adequação desses espaços vazios, e não a partir do uso flexível de mobiliário ou outras estratégias de flexibilidade. Por isso, a modularização do projeto além de atender à estabilidade necessária para o processo

de customização, também atendeu a necessidade de flexibilidade contínua do projeto ao longo do tempo.

Para isso, a linguagem projetual foi desenvolvida visando a expansibilidade coordenada da habitação de acordo com as necessidades específicas do usuário. Ou seja, a planta modular permite que o terreno seja mais bem apropriado. Isso porque sobre a habitação existe uma cobertura única de formato retangular de modo a gerar espaços vazios cobertos e funcionais. Essa possibilidade diminui custos, permite que o espaço possa ser posteriormente fechado e tenha seu uso convertido pelo próprio usuário. No entanto, diferentemente de projetos de habitações que possuem flexibilidade padronizada, ocupando espaços já previstos para ampliação em planta (as habitações incrementais de Alejandro Aravena no Chile, o Conjunto Pedregulho no Rio de Janeiro de Affonso Riedy, dentre outros). Nesse caso, a evolução do projeto é um elemento passível de customização, uma vez que atende demandas específicas do usuário e do contexto local. Assim, conforme pode ser observado na Figura 25, independente da variabilidade da função e dos acabamentos conferidos pelo usuário, posteriormente, a expansão ocorre sempre no mesmo sentido. No entanto, no projeto customizado, a flexibilidade também é elemento passível de customização, uma vez que a expansão da habitação irá atender interesses específicos do usuário, do terreno, entre outros fatores, como é possível observar na Figura 26.

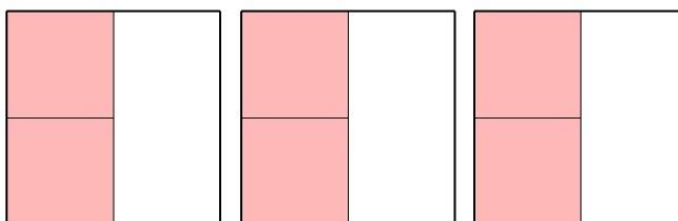


Figura 25: Nos projetos padronizados, a flexibilidade da habitação é padronizada. Fonte: Autor.

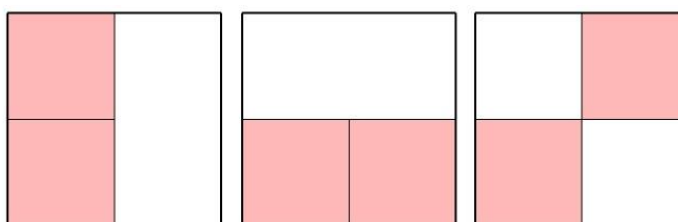


Figura 26: No projeto customizado, a flexibilidade também é elemento passível de customização.

Fonte: Autor.

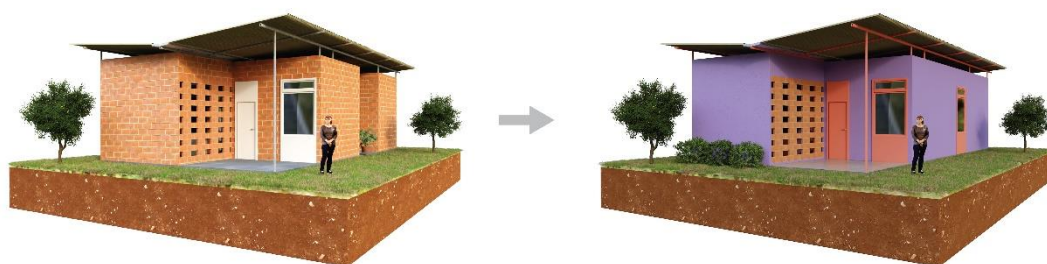


Figura 27: Simulação de evolução a longo prazo de uma das habitações desenvolvidas. Fonte: Autor.

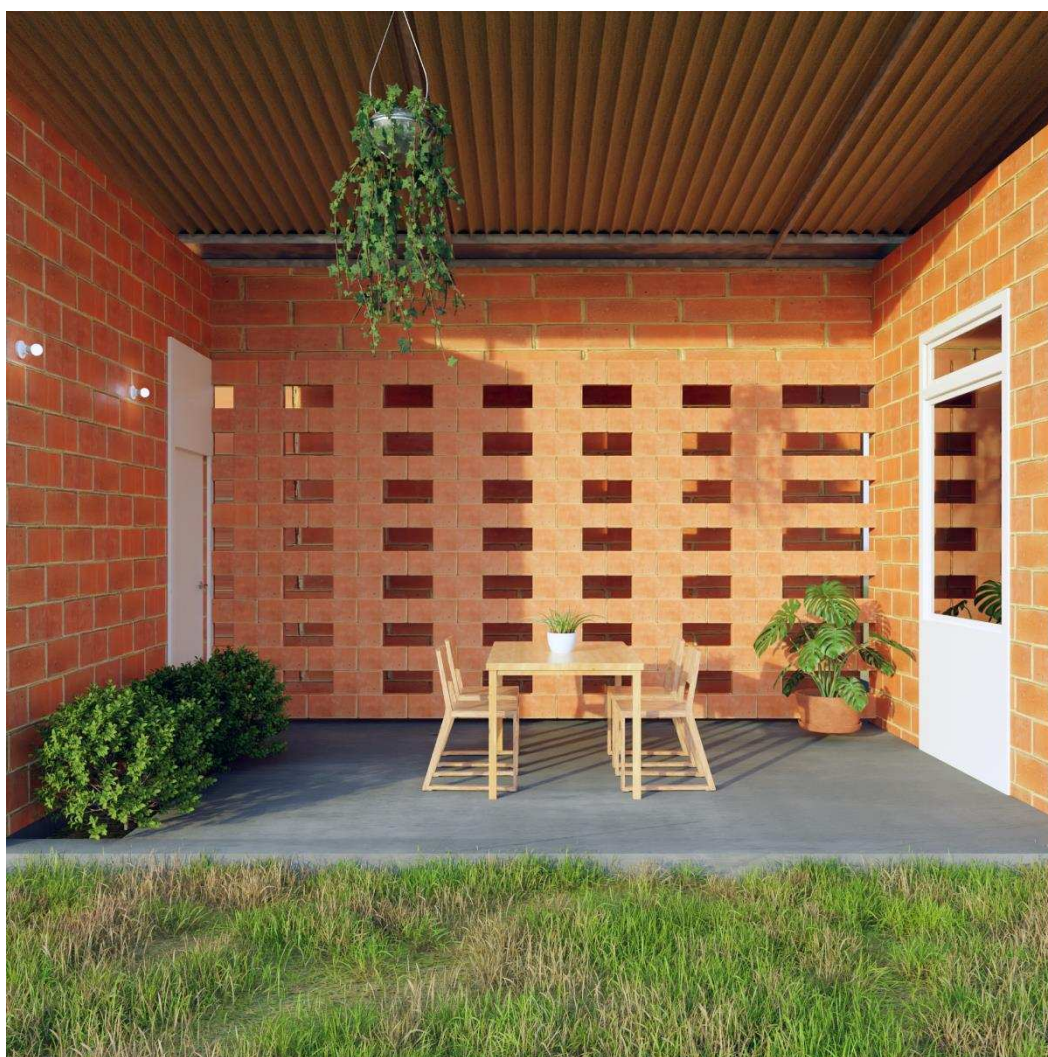


Figura 28: Exemplo de área externa coberta de uma das habitações sendo utilizada como uma área de refeições ao ar livre. Fonte: Autor.

3.3.1 Aspectos construtivos da linguagem arquitetônica

A seguir, na Figura 29, é apresentada uma das soluções geradas pelo subsistema de design como representante da linguagem arquitetônica. Em seguida são apresentados os principais pontos que caracterizam a linguagem arquitetônica desenvolvida com ilustrações esquemáticas que representam as regras da linguagem.



Figura 29: Exemplo de instância do universo de soluções possíveis gerado a partir do subsistema de design desenvolvido no presente trabalho e suas principais características construtivas. Fonte: Autor.

Cobertura: Cobertura aberta e composta por painéis ondulados de fibrocimento, instalado sobre perfis metálicos formados a frio, composta por montantes verticais, terças e caibros. Este sistema foi escolhido por ser leve, de fácil execução e manutenção.

Esquadrias-painel: Ocupam toda a extensão do pé-direito da edificação. Foram projetadas para facilitar a instalação e a execução das alvenarias. Podem ser facilmente removidas e realocadas em outras partes da edificação para gerar novas configurações. Além disso, dispensam a necessidade de contra-vergas.

Estrutura metálica complementar: Fornece suporte para a cobertura nas externas cobertas, assim, mantém-se sua forma retangular e independente da forma da edificação. Pode ser utilizada como reforço para futuras expansões. Além disso é leve e de fácil manipulação para execução.

Estrutura portante de tijolos cerâmicos: o uso de tijolos cerâmicos é justificado pelo fácil acesso a esse material na região e pela sua tradição construtiva local, visando futuras expansões e manutenções por parte dos próprios moradores, ou a partir de mão-de-obra barata. Optou-se por tijolos com função estrutural nas vedações externas.

Paredes vazadas: Possuem tripla função: fornecer luz e ventilação aos ambientes internos; gerar espaços semi-integrados; servirem como pele de vedação. Pode ser composta de blocos cerâmicos comuns intercalados ou ainda a partir de diversos tipos de blocos cerâmicos vazados.

Fundações: Fundação do tipo radier concretada *in loco*. A fundação radier foi escolhida por ser facilmente executada devido ao padrão retangular das habitações e seu baixo custo de execução.

Laje de cobertura: o sistema de lajes pré-moldado utilizando vigotas treliçadas para apoio de lajotas cerâmicas. Esse sistema foi escolhido por seu baixo custo, rapidez e facilidade na execução, além do uso da lajota cerâmica condizente com a tradição construtiva local.

Amarração estrutural: O apoio da cobertura é feito sobre uma cinta composta por blocos do tipo canaleta cerâmicos preenchidos com concreto armado responsáveis pela amarração estrutural da habitação.

3.3.2 Lógica projetual

Conforme já visto, na CM, o processo de projeto ocorre de maneira explícita a partir de um sistema de design baseado em dados objetivos. Ademais, é necessário que esses dados sejam manipulados a partir de processos governados por regras e restrições bem definidas que irão compor uma lógica projetual capaz de ser replicada, cujos resultados serão novas instâncias do universo de soluções possíveis

A sustentabilidade desse processo depende de um nível de automatização que será definido de acordo com a tecnologia implementada em uma das partes interdependentes do sistema de design, o subsistema de geração, que em determinada medida garantirá o cumprimento das regras e restrições e que também permitirá maior agilidade de produção de resultado, seja a partir de uma automatização completa ou de auxílio na tomada de decisão.

Logo, para que as instâncias atendam adequadamente às demandas específicas e para que sejam geradas totalmente ou parcialmente automatizadas, a linguagem projetual do sistema de design deve ser desenvolvida com base em diretrizes que consideram a tecnologia em que será implementada.

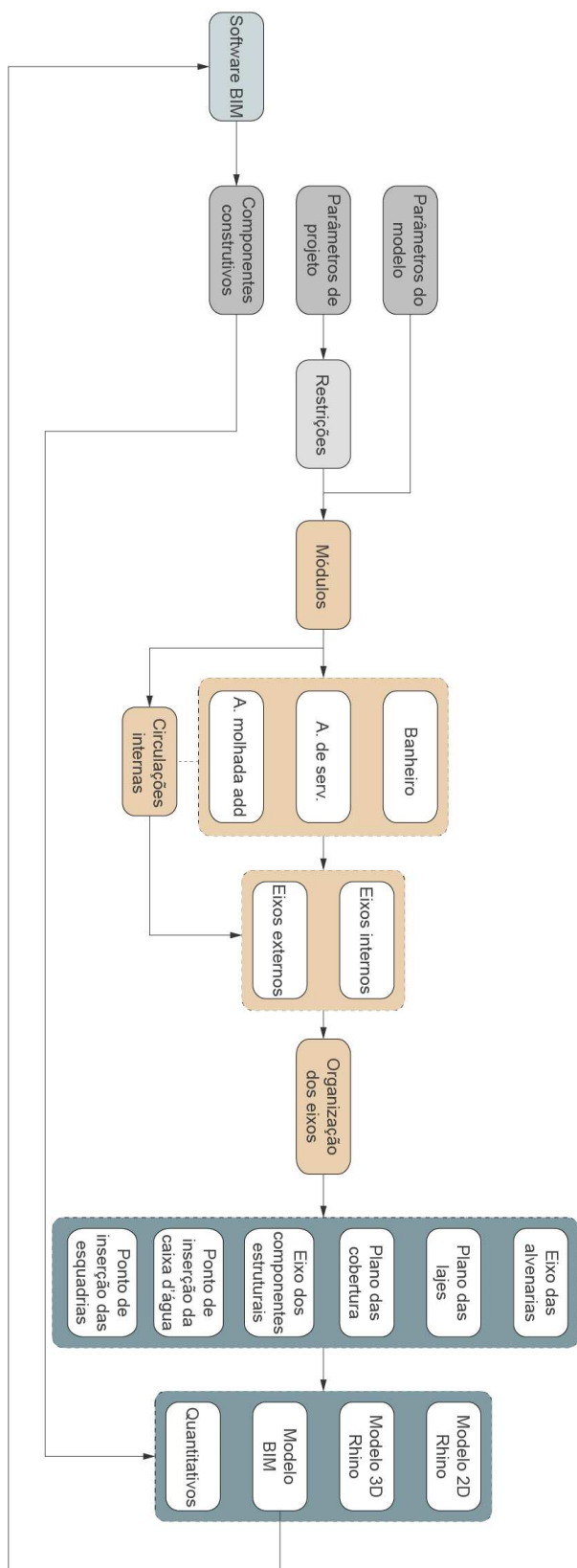
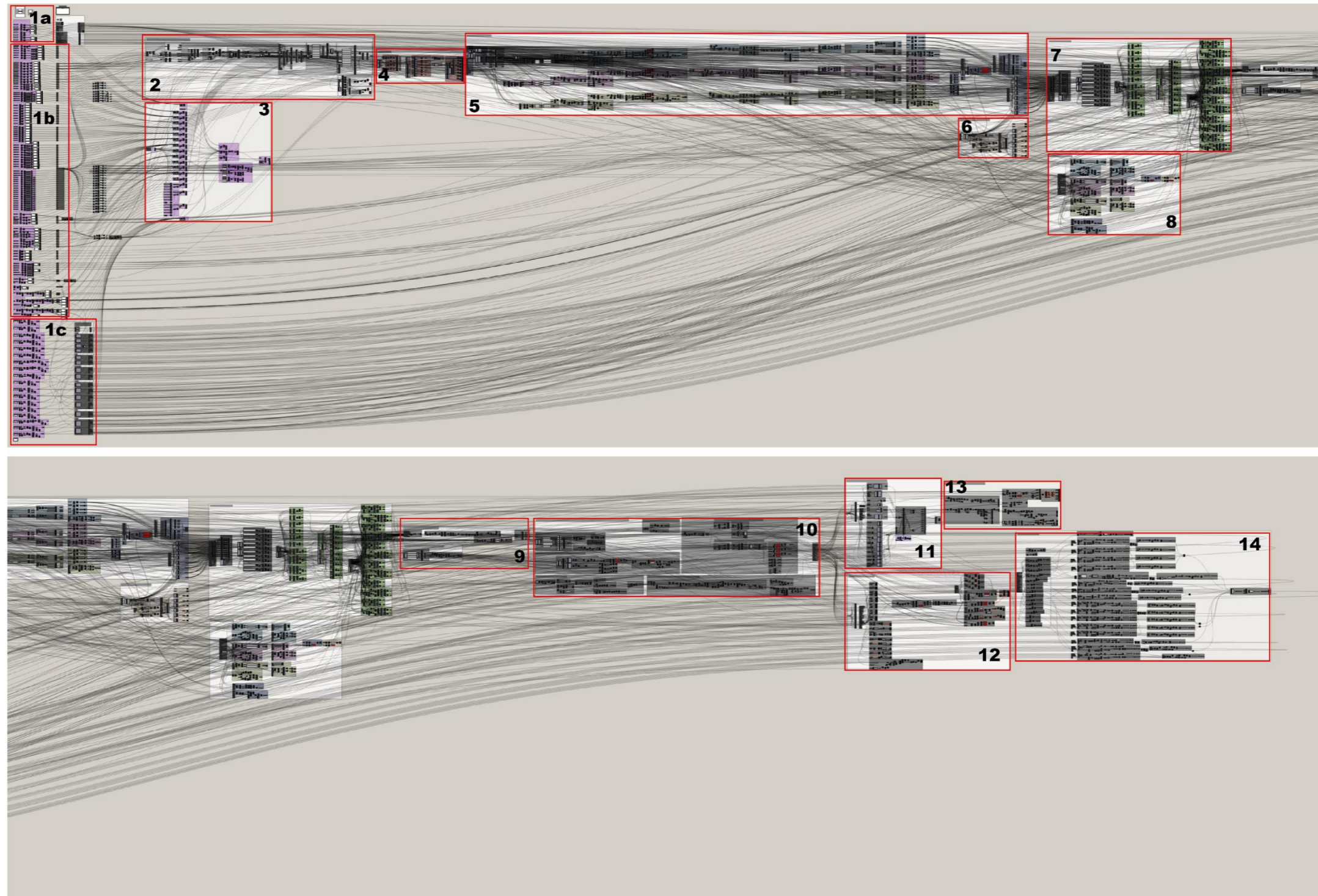


Figura 30: Representação simbólica do sistema de geração de design desenvolvido pela pesquisa.

Fonte: Autor.



1a) parâmetros do modelo
1b) parâmetros de projeto
1c) parâmetros dos componentes BIM

2) identificações e restrições
3) interface humana
4) construção dos módulos

5) construção das áreas molhadas
6) construção das circulações internas
7) seleção dos eixos internos

8) seleção dos eixos externos
9) organização dos eixos selecionados
10) definição das geometrias de referência

11) Representação 3D no Rhino
12) Construção do modelo BIM
13) Representação 2D no Rhino

14) cálculo dos quantitativos

Figura 31: Apresentação do script. Fonte: Autor.

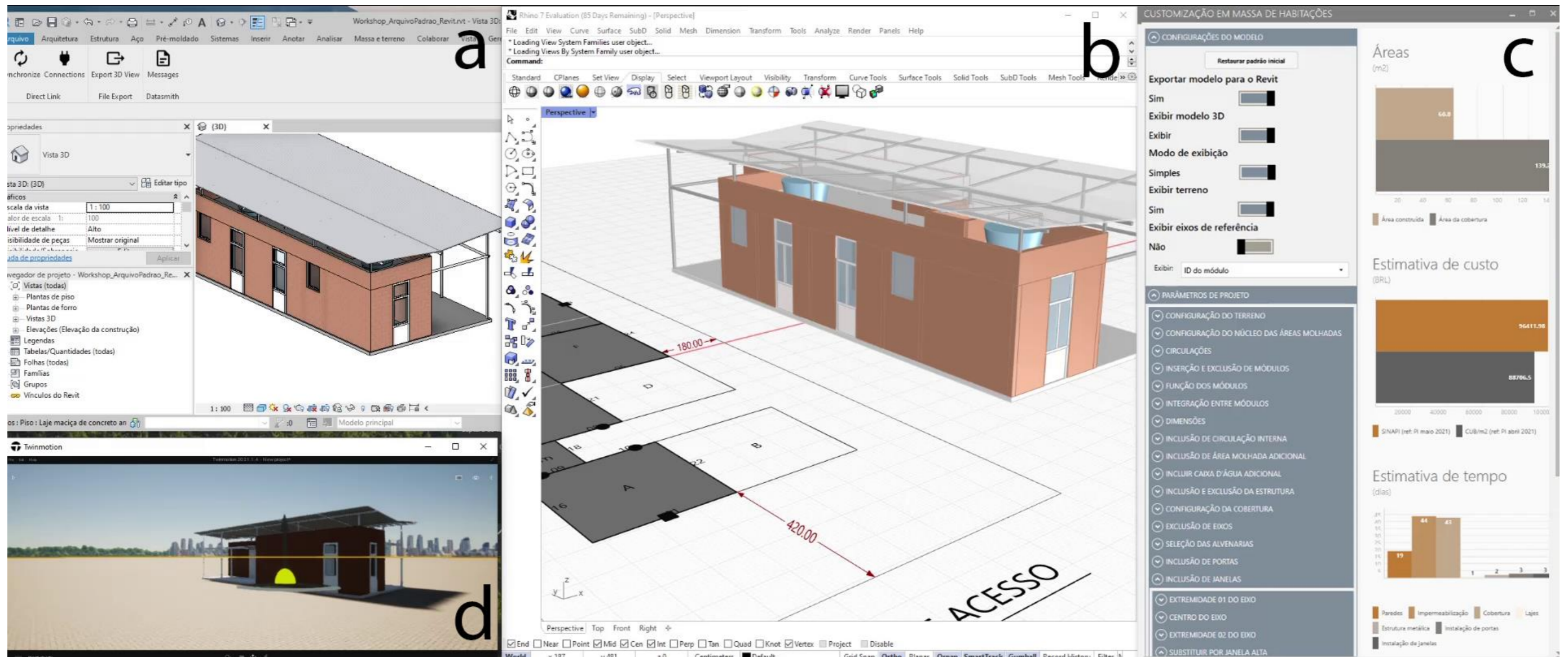


Figura 32: Apresentação da plataforma em funcionamento: a) modelo BIM atualizado em tempo real conforme manipulação no código; b) representação 2D e 3D da solução; c) interface de manipulação dos parâmetros e visualização das informações pertinentes ao projeto; d) ambiente de realidade virtual. Fonte: Autor.

3.3.2.1 Universo de soluções possíveis

Segundo Piller (2019), o universo de soluções possíveis engloba todas as variabilidades possíveis de serem geradas dentro de uma série de modificações de características definidas com base nas necessidades do usuário final. Dito isso, a linguagem do projeto possui foco na variabilidade da distribuição do espaço construído pelo terreno, uma vez que entende-se que esta característica atende aquela que é considerada a principal necessidade idiossincrática dos usuários finais de habitação de interesse social, o uso do espaço distribuído ao longo do terreno.

Para isso, foi utilizado um sistema modular retangular distribuído ao longo do terreno, a inserção e exclusão de áreas fechadas, áreas abertas com cobertura, e área completamente abertas, enquanto a definição do layout interno ocorre a partir de um sistema de subdivisão das circulações e áreas molhadas. As regras e relações detalhadas da lógica de projeto são expostas no item 3.3.3. Com base nesse processo, estima-se que a linguagem projetual alcance um número próximo a 7 quintilhões, desconsiderando as variações em função dos parâmetros dimensionais, conforme detalhado no item 4.1. A Figura 33 apresenta alguns resultados oriundos do universo de soluções possíveis.

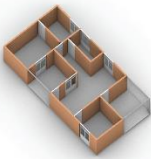
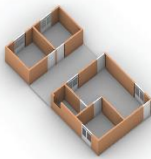
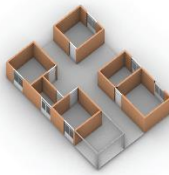



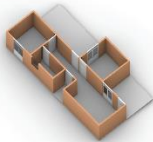
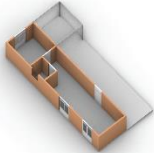
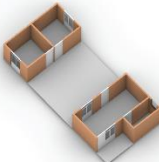

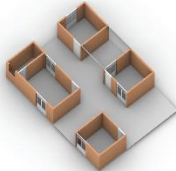
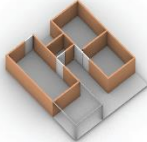
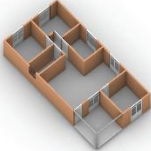
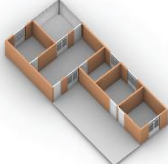
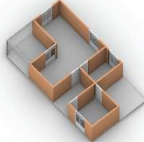
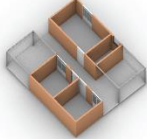
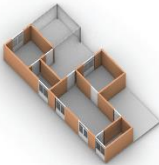
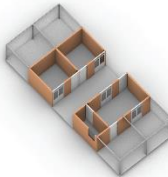

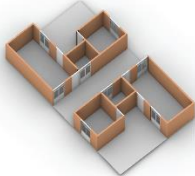
| | | | |
|---|---|--|---|
|  |  |  |  |
| A = 61,42 C = 79580,66 | A = 61,44 C = 77023,96 | A = 51,20 C = 101858,87 | A = 51,20 C = 81665,88 |
|  |  |  |  |
| A = 40,96 C = 47378,35 | A = 40,96 C = 60087,13 | A = 51,20 C = 73951,1 | A = 40,96 C = 69212,19 |
|  |  |  |  |
| A = 45,76 C = 76412,63 | A = 54,08 C = 64878,91 | A = 51,20 C = 104442,84 | A = 45,76 C = 73569,98 |
|  |  |  |  |
| A = 71,68 C = 83802,68 | A = 51,20 C = 86552,89 | A = 40,96 C = 70719,63 | A = 40,96 C = 75950,17 |
|  |  |  |  |
| A = 45,76 C = 82968,03 | A = 40,96 C = 87282,36 | A = 40,96 C = 63205,73 | A = 61,44 C = 123838,68 |

Figura 33: Resultados gerados utilizando a plataforma desenvolvida. A = área construída dos projetos em m²; C = estimativa de custo da construção, com base nas referências da SINAPI em reais. Fonte: Autor.

3.3.2.2 Processo de desenvolvimento

O primeiro passo para o desenvolvimento do sistema foi compreender de que maneira os dados oriundos do programa BIM eram interpretados pelo ambiente de modelagem algorítmico-paramétrica e vice-versa. Por exemplo, uma simples linha criada a partir da coordenada de pontos inseridas no Grasshopper serve como eixo de referência para a criação de uma parede paramétrica dentro do programa BIM ou um dado muito específico como o peso de uma viga metálica dentro do BIM pode ser interpretado com um número qualquer dentro do ambiente de modelagem algorítmico paramétrica. Este domínio das ferramentas foi anterior ao processo de desenvolvimento da própria lógica projetual para evitar retrabalhos, como já foi pontuado anteriormente. Ademais, o estudo prévio também foi importante para que fossem definidos quais seriam os dados de entrada necessários oriundos do programa Revit e os dados de saída do plugin Grasshopper para o programa Revit necessários para a construção do modelo central.

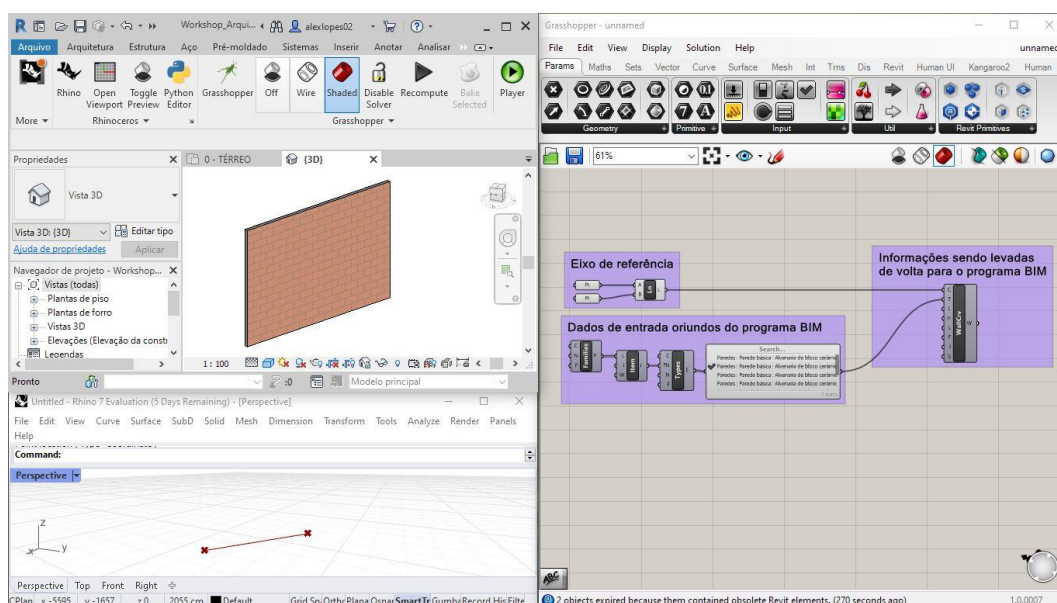


Figura 34: Conexão entre o programa Revit e o ambiente de modelagem algoritmo paramétrico Grasshopper utilizando o plugin Rhino Inside Revit. Fonte: Autor.

Após a compreensão de como ocorreria a comunicação entre ambientes, iniciou-se a criação dos objetos BIM dentro do programa Revit. Foi desenvolvido um modelo padrão com todas os objetos BIM necessários para a simulação dos componentes construtivos escolhidos para compor a linguagem arquitetônica da

edificação. Para esta pesquisa somente foram atribuídos aos objetos BIM os dados necessários para cálculos referentes ao custo e tempo de execução da edificação. No entanto, outros dados referentes ao desempenho poderiam também ser atribuídos.

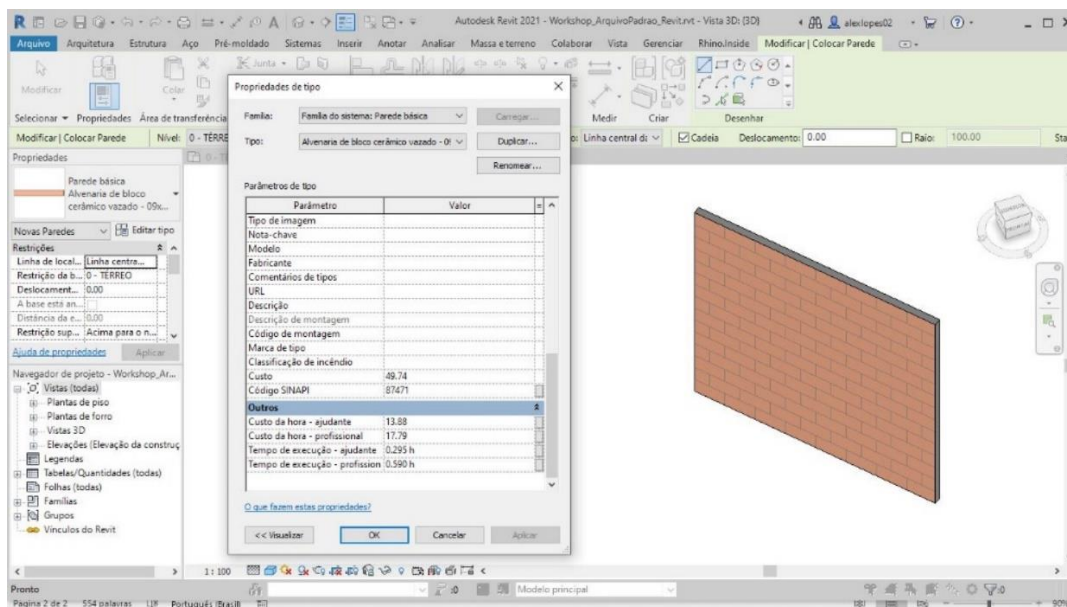


Figura 35: Modelagem de dados de uma parede de blocos cerâmicos. Fonte: Autor.

Em seguida, foi no Grasshopper o algoritmo para o processamento automatizado das regras e restrições da lógica projetual. É importante ressaltar que este não foi um processo linear, uma vez que o desenvolvimento do algoritmo foi realizado paralelamente ao desenvolvimento da lógica projetual. Primeiro, foram definidos os parâmetros de projeto necessários para a construção dos módulos que compõem a base compositiva dos projetos, a movimentação e exclusão de eixos para integração entre os módulos, e geração das subdivisões necessárias para construir as áreas molhadas e as circulações. Em seguida foram definidos diversos comandos e regras para exclusão de eixos sobrepostos para organizar e identificar eixos resultantes como referência para a criação de elementos de saída para o desenvolvimento do model central em BIM.

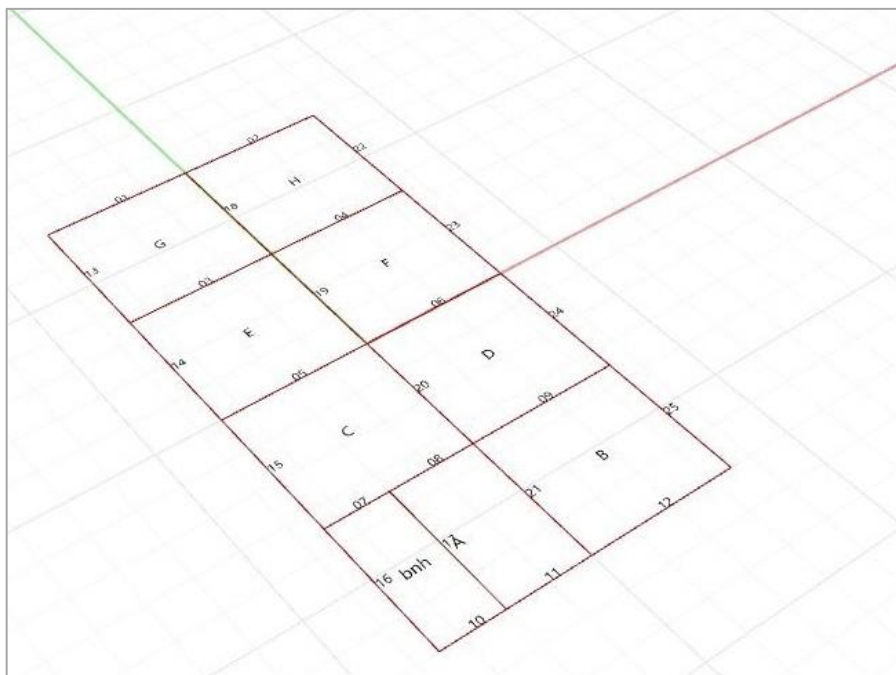


Figura 36: Construção dos módulos e subdivisão da área molhada. Identificação dos módulos e dos eixos. Fonte: Autor.

Em seguida, outro grupo de parâmetros, oriundos do programa BIM, traziam as informações necessárias para cálculo de quantitativos, informações de custo e tempo de execução estimado. Embora essas informações pudessem ser computadas e exibida em forma de tabelas dentro do próprio programa BIM, foi importante trazer esses dados para o Grasshopper para que pudessem ser exibidos estes valores em tempo real dentro de uma interface mais amigável que seria construída posteriormente. A partir destes dados foram criadas rotinas para o processamento destas informações em tempo real.

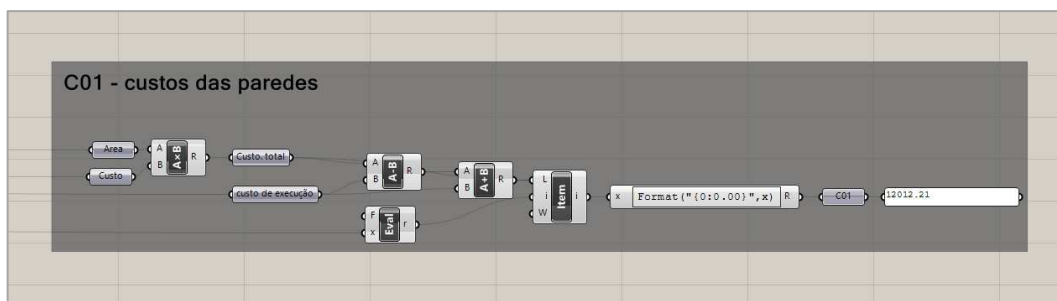


Figura 37: Rotina para cálculo para custo da execução das paredes. Fonte: Autor.

A última classe de parâmetros definida foram os parâmetros responsáveis por controlar a exibição do modelo. Dependendo do *hardware* disponível e do nível de detalhe do modelo, o processamento da modelagem poderia prolongar-se por muito tempo. Tendo isso em vista, foram criados parâmetros e rotinas para controlar o nível de detalhamento e exibição, bem como das informações de auxílio aos usuários para utilização da programação, tais como os eixos guias e o norte do terreno. Houve ainda o controle de exibição de outras informações para não comprometer visualmente o modelo.

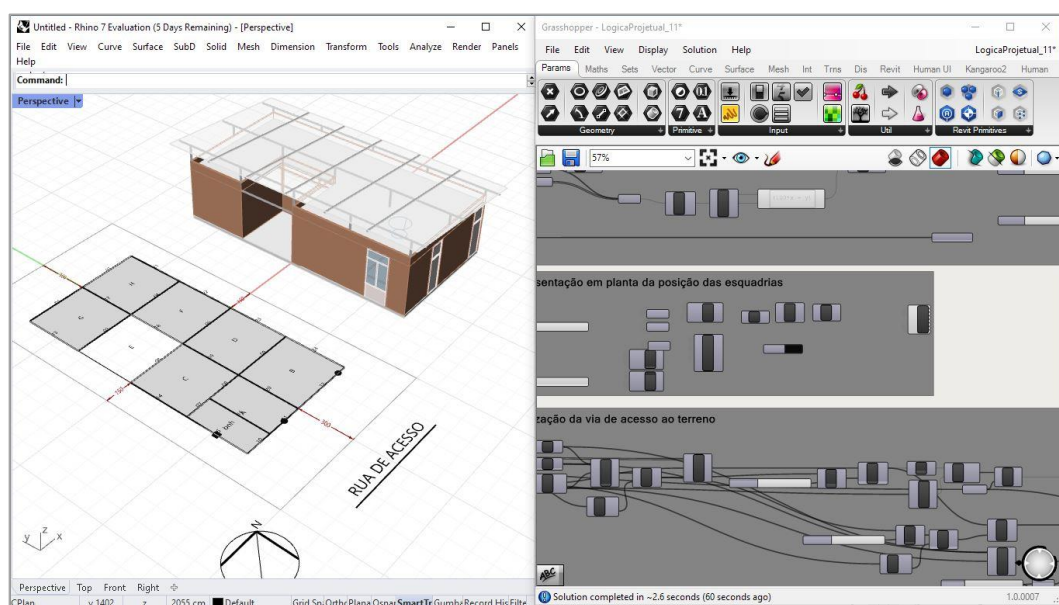


Figura 38: Representação das informações do modelo utilizando a *viewport* do programa Rhinoceros 3D. Fonte: Autor.

Como o plugin Revit Inside Rhino possui uma versão ainda em teste, a comunicação entre plataformas gerou alguns erros, que prejudicaram a visualização em tempo real da alteração de parâmetros do modelo central dentro programa BIM. Para contornar este problema, permitindo a visualização em tempo real, de forma estável, foi criado um modelo tridimensional representando a habitação desenvolvida dentro do programa Rhinoceros 3D. Em seguida, para diminuir o peso do processamento da conexão entre as plataformas, foi criado um parâmetro booleano responsável por controlar a comunicação entre estas. Assim, ao ser acionado, este botão bloqueia a comunicação entre as plataformas e o modelo central passa a não ser mais exibido dentro do programa. Percebeu-se que quando ocorriam erros na construção da geometria do modelo BIM, o bloqueio e, em seguida, o retorno da

comunicação eram o suficiente para que o modelo fosse recarregado da forma correta com os devidos erros sanados. Essa solução de mostrou estável em todas as manipulações feitas durante o uso do algoritmo.

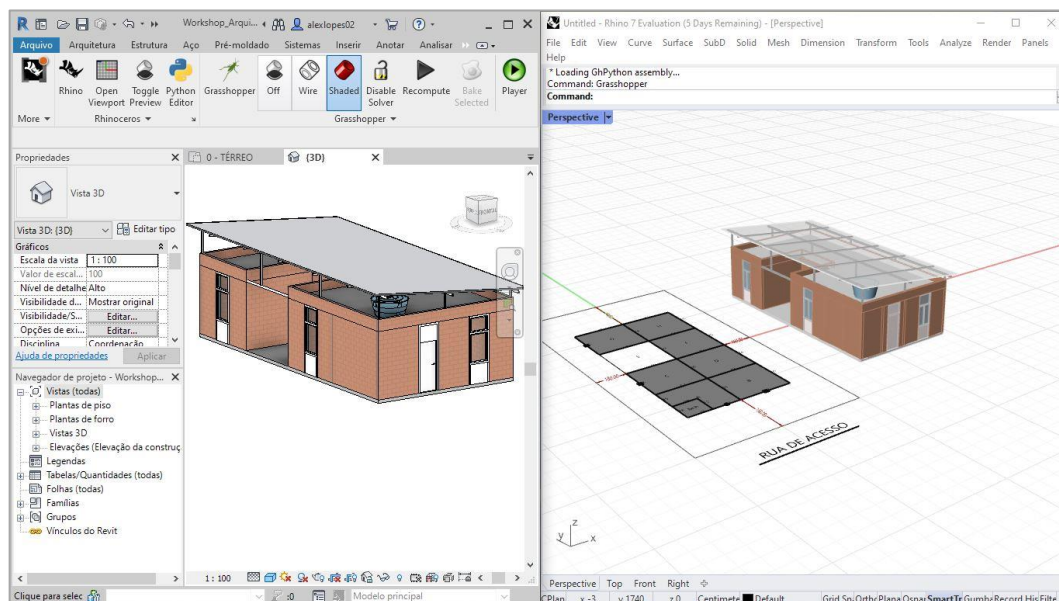


Figura 39: Exibição simultânea do modelo central dentro do programa BIM à esquerda e modelo tridimensional dentro do programa Rhinoceros 3D. Fonte: Autor.

Por último, foi desenvolvida uma interface de usuário com o objetivo de tornar a manipulação dos parâmetros e a visualização dos dados da construção mais fluida e amigável para usuários. O objetivo desta interface é permitir que qualquer projetista, com um pequeno treinamento pudesse ser capaz de utilizar o programa, mesmo com pouca ou nenhuma experiência com as ferramentas utilizadas no desenvolvimento do sistema.

Para isso, foi utilizado um plugin externo instalado dentro ambiente do Grasshopper chamado HUMAN UI. O plugin HUMAN UI adiciona alguns componentes ao leque de opções de componentes já existentes dentro do Grasshopper justamente com o objetivo de conceder ao desenvolvedor ferramentas para criação de interfaces e visualização de dados amigável ao usuário. A partir do seu uso foi desenvolvida a interface apresentada na Figura 40.

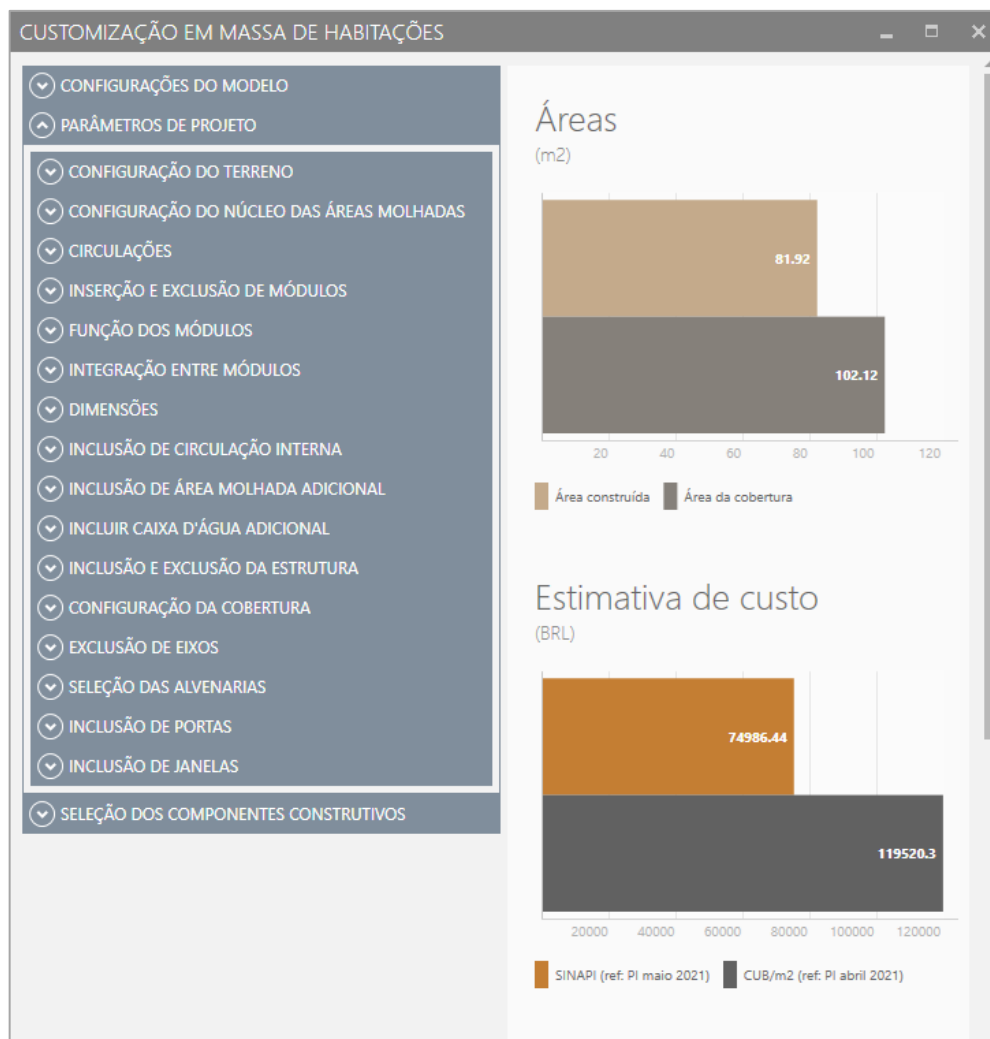


Figura 40: Interface do usuário desenvolvida. Fonte: Autor.

3.3.3 Regras e restrições

3.3.3.1 Composição modular

A base compositiva das edificações é definida por oito módulos paramétricos que ao serem manipulados definem os espaços e a volumetria da edificação. A partir de intersecção de um eixo guia central (y) e de três eixos perpendiculares (x), são definidos pontos de inserção que dão origem aos módulos, alocados em pares AB, CD, EF e EG. A configuração longitudinal dos módulos foi escolhida por assemelhar-se à proporção dos lotes do Residencial Parque Brasil, e para garantir um sentido claro de expansão das habitações.

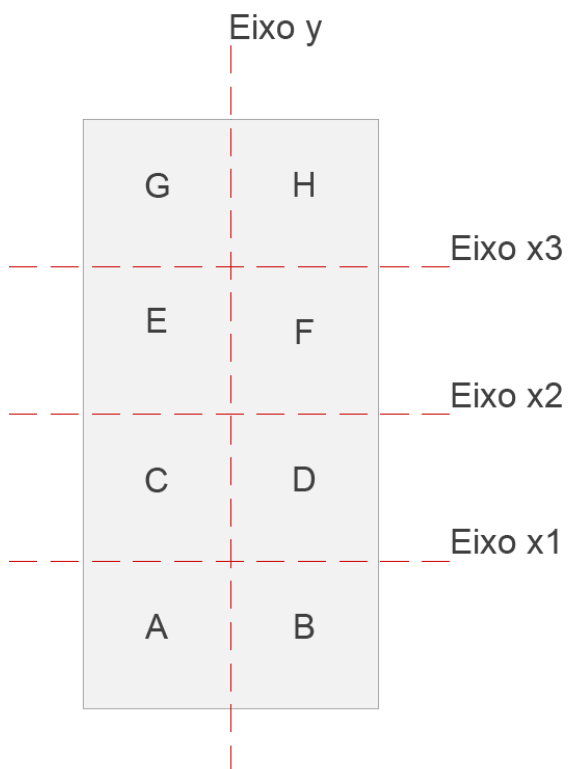
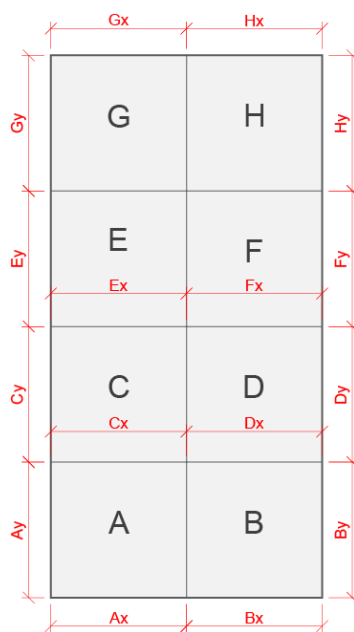


Figura 41: Construção dos módulos que formam a base compositiva das habitações a partir dos eixos guias. Fonte: Autor.



Módulos

Figura 42: Módulos que compõem a base compositiva das edificações e seus respectivos parâmetros dimensionais. Fonte: Autor.

A variabilidade do projeto a partir da manipulação dos módulos ocorre de três maneiras: (1) alteração dos parâmetros dimensionais dos módulos que obedecem a restrições de acordo com o tamanho do bloco cerâmico a ser utilizado; (2) inclusão ou exclusão dos módulos como área construída, o que permite que sejam geradas áreas vazias e cobertas que tiram proveito das relações entre os espaços internos e externos e conferem infraestrutura para alterações futuras; (3) integração entre os módulos para ampliação de um ambiente em função do seu módulo adjacente ou para total integração entre ambos. A integração entre os módulos visa criar espaços de acesso e circulação adicionais entre eles caso seja necessário. Ela irá movimentar o eixo de divisão entre os módulos acrescentando em um deles o valor de uma circulação mínima estipulada pelo projetista e decrescendo no outro módulo o mesmo valor.

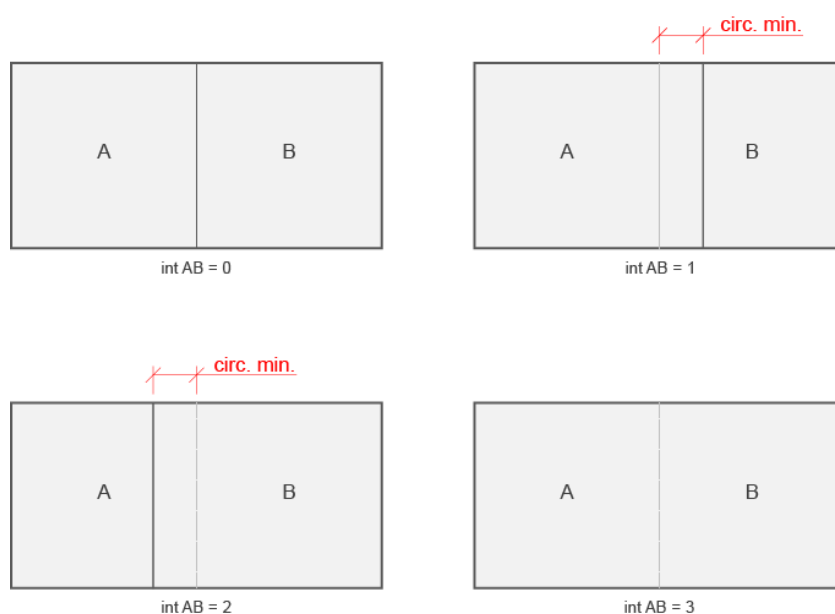


Figura 43: Integração entre os módulos. Fonte: Autor.

A ferramenta BIM escolhida para a aplicação desse experimento utiliza pontos, linhas e planos como referências para alocar os componentes construtivos que conformam o modelo tridimensional central. Logo, é a partir desta matriz compositiva que são retirados estes elementos de acordo com algumas interpretações. Conforme visto anteriormente, os módulos podem ser excluídos. Isso significa dizer que ao excluir um módulo este passará a não ser mais contabilizado como área construída. Neste caso, seus eixos deixam de ser identificados como eixos de referência para a

inserção de alvenarias. A inclusão e exclusão de módulos obedece às seguintes regras:

- Os módulos adjacentes no eixo X conformam pares. Sendo assim, existem 4 pares de módulos: AB, CD, EF e GH.
- Se um dos módulos do par for excluído, então a área construída é substituída por uma estrutura metálica automaticamente.
- Se o par de módulos for excluído não é adicionada uma estrutura metálica automaticamente em seu lugar. Nesse caso, o espaço dos módulos permanece completamente vazio.

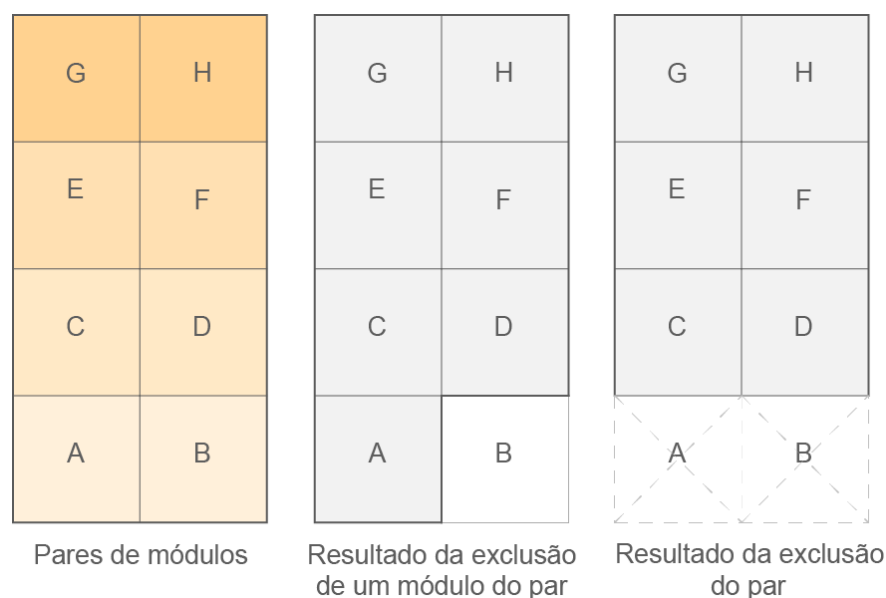


Figura 44: Representação das regras de inclusão e exclusão dos módulos. Fonte: Autor.

A manipulação das dimensões dos módulos também obedece a regras baseado nos pares definidos. Essas regras dimensionais objetivam evitar soluções que poderiam ser demasiadamente difíceis de serem executadas. Sendo assim, as dimensões em Y dos pares CD e EF estão restritas pela seguinte regra: Se $C_y > D_y$, então, $D_y = C_y$ ou se $C_y < D_y$, então $C_y = D_y$. Ela regra se aplica para o par EF. Esta regra não se aplica ao eixo X e nem aos módulos das extremidades.

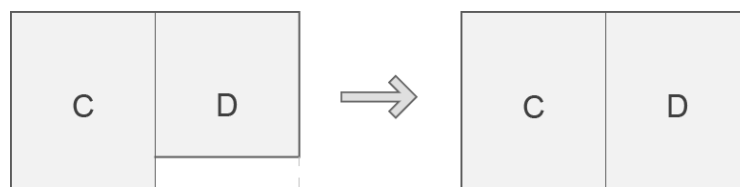


Figura 45: Representação de aplicação das regras dimensionais dos módulos. Fonte: Autor.

Por fim, os módulos também servem como base para subdivisões necessárias para gerar áreas internas menores no projeto, como áreas molhadas e circulações. Nesse caso, todas subdivisões são controladas de acordo com os vértices dos módulos que são identificados conforme a Figura 46, independente da sua posição.

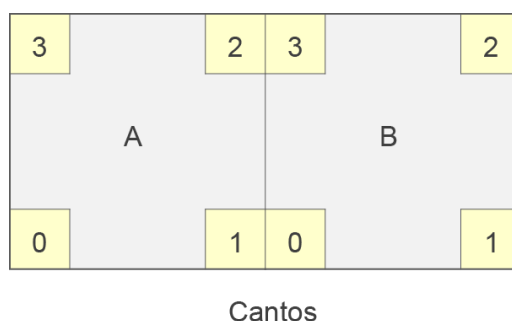


Figura 46: Identificação dos vértices dos módulos. Fonte: Autor.

3.3.3.2 Circulações externas

Os eixos centrais utilizados para construção dos módulos, também atuam como guia para a definição de circulação entre os módulos. Estas áreas possibilitam novas configurações de vazios cobertos para melhor aproveitamento do terreno com baixo custo adicional. Esta circulação não pode ter um valor menor do que aquele estipulado como circulação mínima do projeto. Além disso, caso sejam alocadas áreas molhadas nas circulações externas, conforme será visto adiante, a circulação será ampliada para que seja possível abrigar a área molhada. Caso a dimensão desse espaço seja maior que a área molhada, então nenhuma alteração será feita.

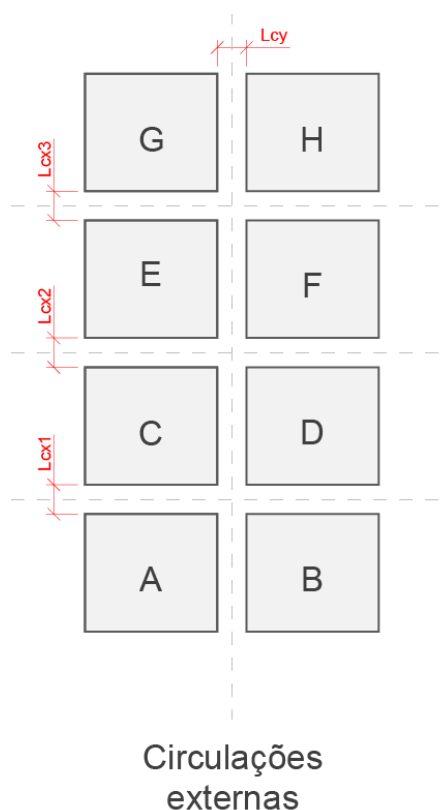


Figura 47: Abertura de circulações externas entre os módulos a partir dos eixos guias. Fonte: Autor.

3.3.3.3 Composição do núcleo das áreas molhadas

O agrupamento das áreas molhadas é uma estratégia comum em projetos de habitação de interesse social para racionalizar o projeto e execução das instalações. Também, é uma estratégia usual para garantir que a flexibilidade das edificações permita a evolução a longo prazo coordenada (BRANDÃO, 2011; LOGSDON e FABRICIO, 2020). Portanto, foram definidas uma série de regras e restrições na lógica projetual que garantisse a formação desse núcleo em todos os projetos.

As áreas molhadas são geradas a partir de subdivisões posicionadas nos vértices dos módulos. A área molhada que coordena toda a configuração do núcleo é o banheiro. Sendo assim, primeiro, este deve ser posicionado dentro do projeto. De acordo com a posição do banheiro é alocado o eixo hidráulico que será sempre o eixo adjacente x ou y ao vértice do módulo em que o banheiro está posicionado. Sua posição serve para definir como será a configuração do núcleo das áreas molhadas e garantir que sempre haverá pelo menos um eixo voltado para o exterior da edificação. Caso o eixo hidráulico faça divisa com outro módulo, este módulo adjacente será

excluído automaticamente para garantir a existência de uma saída de ar para a área molhada. A Figura 49 ilustra essa regra, onde o eixo hidráulico garante que sempre haverá a possibilidade de saída e entrada de ar a partir da exclusão do módulo adjacente, caso não haja outra possibilidade.

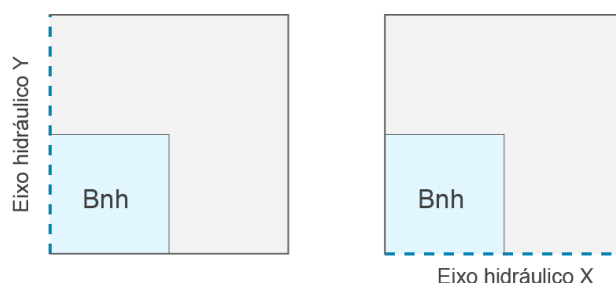


Figura 48: Construção do banheiro e posicionamento do eixo hidráulico. Fonte: Autor.

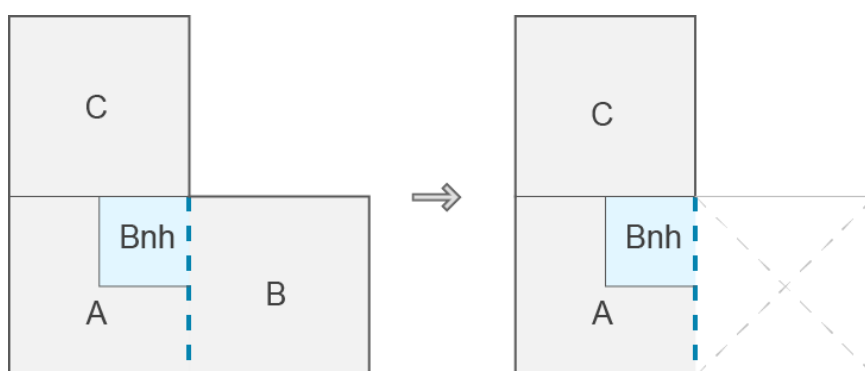


Figura 49: Regra de exclusão de módulos adjacentes ao eixo hidráulico para garantia de entrada e saída de ar. Fonte: Autor.

O núcleo hidráulico pode ser composto somente pelo próprio módulo que abriga o banheiro ou pode ser adicionado a ele o módulo adjacente. O módulo adjacente a ser adicionado será aquele que estiver na direção do eixo hidráulico. A adição de um módulo a mais garante que haverá maior área para instalações hidráulicas dentro projeto.

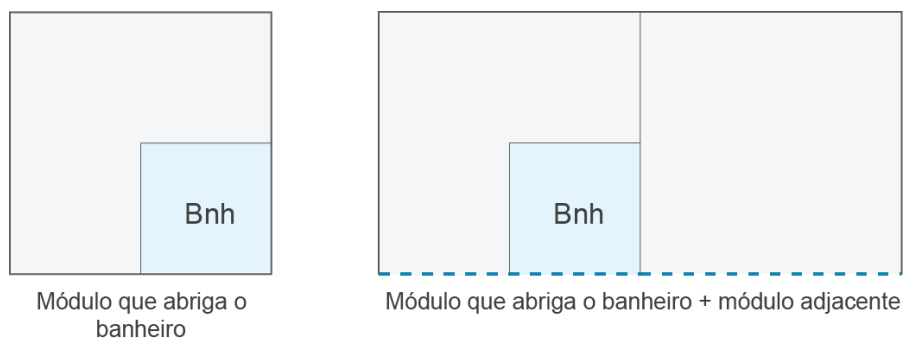


Figura 50: Composição do núcleo hidráulico com somente um módulo ou dois módulos. Fonte: Autor.

Ao núcleo hidráulico, poderá ser adicionada uma área molhada adicional de função livre, que pode servir, por exemplo, como área de serviço, ou um segundo banheiro. Seu posicionamento e suas dimensões estão restritos por algumas regras para manter a consistência do núcleo. A seguir são definidas as regras para o seu posicionamento e dimensionamento:

- A área de molhada adicional sempre será posicionada paralela ao banheiro na direção definida pelo eixo hidráulico;
- A dimensão da área molhada adicional perpendicular ao eixo hidráulico sempre será a mesma do banheiro para alinhamento das paredes, facilitando a execução;
- A área molhada adicional será alocada no mesmo módulo que o banheiro ou no módulo adjacente dependendo da configuração do núcleo das áreas molhadas escolhida e da posição do banheiro;
- A área molhada adicional poderá ser posicionada adjacente ao banheiro ou no canto oposto a ele.

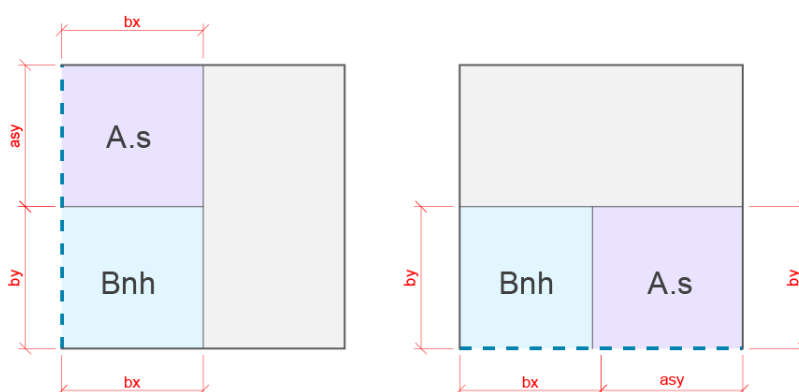


Figura 51: Posicionamento da área molhada adicional sendo guiado pelo eixo hidráulico. Fonte: Autor.

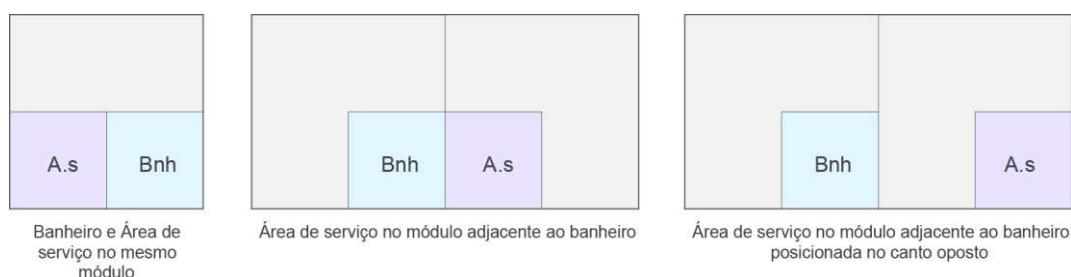


Figura 52: Diferentes tipos de posicionamento da área molhada adicional em relação ao banheiro. Fonte: Autor.

Além das regras compositivas, a formação do núcleo hidráulico também é regida por duas regras dimensionais. A primeira regra (a) define que a dimensão x do banheiro deverá ser menor ou igual à dimensão x do módulo que o abriga. Se $bx > mx$, então $bx = mx$. A mesma regra se aplica a dimensão y . A mesma regra se aplica a todas as áreas molhadas;

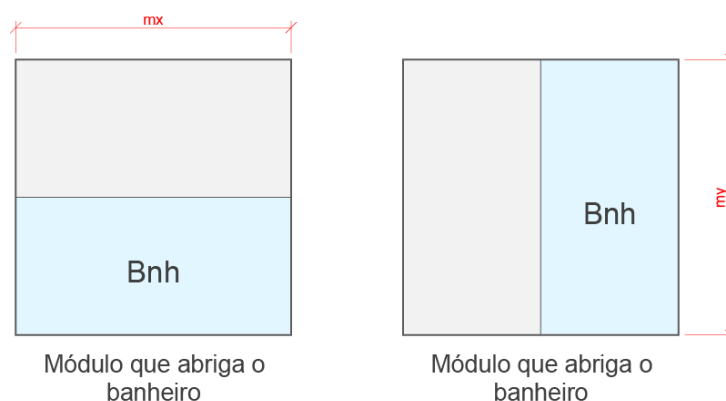


Figura 53: Representação da aplicação da regra descrita em a. Fonte: Autor.

Na segunda regra (b), a dimensão x do banheiro deverá ser menor ou igual a dimensão x do módulo subtraída da dimensão definida para a circulação mínima. Se $(bx + \text{circ. min.}) > mx$, então $bx = mx$. Essa regra inibe a geração de espaços de circulação dentro do projeto com largura menor do que aquela definida pela circulação mínima. A mesma regra se aplica a dimensão y e a todas as áreas molhadas

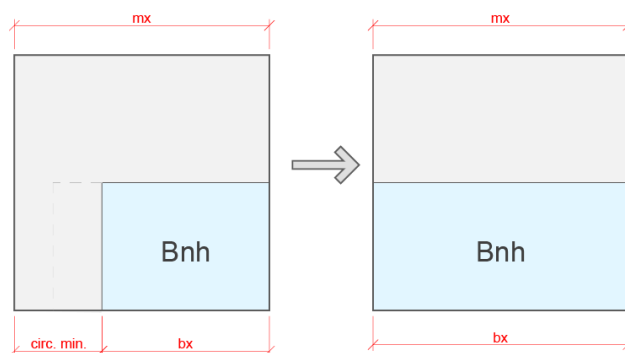


Figura 54: Representação de aplicação da regra definida e b. Fonte: Autor.

Caso sejam abertas circulações entre os módulos, o banheiro poderá ser alocado na circulação externa perpendicular ao eixo hidráulico. Nesse caso, as regras dimensionais são as mesmas citadas anteriormente. No entanto, a dimensão do módulo na direção do eixo hidráulico é substituída pela dimensão da largura da circulação em que a área molhada está alocada.



Figura 55: Exemplo de posicionamento de uma área molhada na parte externa da edificação. Fonte: Autor.

Por fim, é importante ressaltar que o núcleo das áreas molhadas irá definir a posição da caixa d'água da habitação que será sempre alocada no centro do módulo que abriga o banheiro.

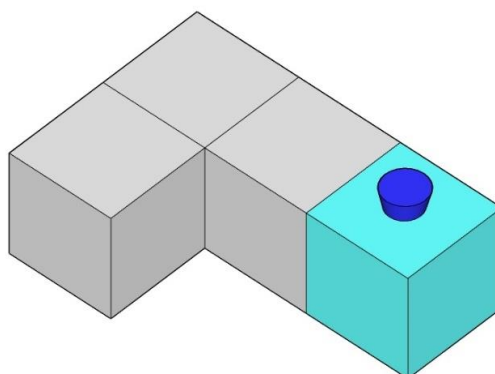


Figura 56: Posicionamento da caixa d'água de acordo com a configuração do núcleo hidráulico. Fonte: Autor.

3.3.3.4 Subdivisões extras

As regras de subdivisão dos módulos são utilizadas para criação do núcleo das áreas molhadas conforme visto. No entanto, possuem outras aplicações dentro da lógica projetual: a criação de uma segunda área molhada adicional e a criação de uma circulação extra entre módulos.

Embora o núcleo das áreas molhadas garanta a racionalização das instalações, existem casos em que é necessário a criação de áreas molhadas fora deste núcleo. Por exemplo na criação de uma suíte, ou de um banheiro para uma área comercial dentro do projeto. Por isso, a segunda área molhada adicional, possui menos restrições de posicionamento em relação ao núcleo hidráulico e pode ser acompanhada de uma caixa d'água adicional, em casos nos quais a área molhada estiver separada fisicamente dos módulos que abrigam a caixa d'água.

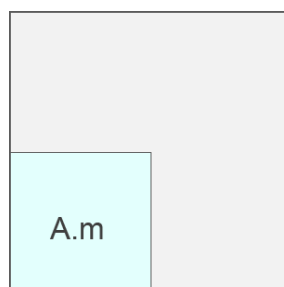


Figura 57: Subdivisão de um módulo para alocar uma área molhada adicional. Fonte: Autor.

A segunda área molhada adicional, poderá ser acrescentada em qualquer um dos módulos fora do núcleo hidráulico, respeitando as mesmas regras e restrições de posicionamento que o banheiro. Acrescenta-se que por via de regra a área molhada adicional não poderá ser adjacente ao banheiro nem à área de serviço quando estes estiverem alocados em alguma circulação externa. Caso ela seja posicionada em um vértice que leve a esta condição, a área molhada adicional será automaticamente posicionada no vértice mais próximo daquele que foi escolhido.

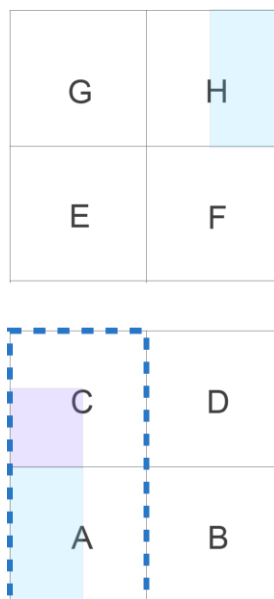


Figura 58: O núcleo hidráulico é composto pelos módulos A e C, no entanto, uma segunda área molhada adicional é posicionada em H. Fonte: Autor.

Outro uso da subdivisão dos módulos é a criação de corredores internos. De tal maneira que a seguinte solução foi desenvolvida: subdivisão em **x** ou **y** em um módulo para criar uma circulação interna. Esta funcionalidade permite que sejam projetadas circulações em módulos intermediários. Por exemplo, o módulo D é um módulo intermediário entre os módulos B e F. Essa circulação possui largura mínima de acordo com parâmetro definido pelo usuário e pode ser posicionado em qualquer lado do módulo. Apesar de ter como principal intuito a criação de circulações, esta subdivisão pode ser utilizada com outros propósitos de acordo com a vontade do projetista.

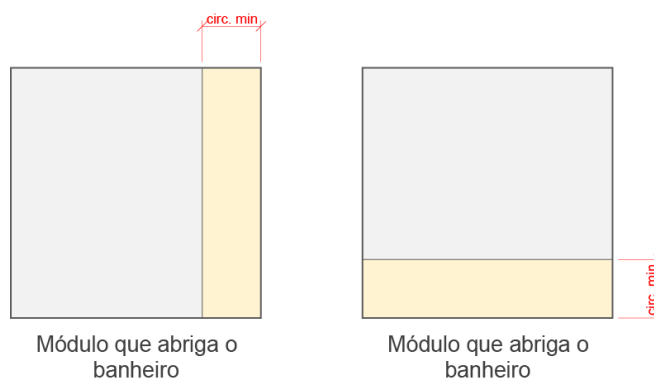


Figura 59: Representação da construção de uma circulação interna a partir do processo de subdivisão coordenado pelos eixos y e x. Fonte: Autor.

3.3.3.5 Configuração da cobertura

A forma da cobertura sempre será um retângulo que cobrirá toda a área construída da edificação. Esta solução visa gerar estabilidade na execução da cobertura independente dos espaços que compõem a habitação. A cobertura sempre irá se estender a todos os módulos ativos, conforme pode ser observado na Figura 60. Caso os dois módulos da extremidade não sejam ocupados por área construída ou um esqueleto estrutural, então a extensão da cobertura irá se limitar até o par de módulos mais extremo que atende a estas condições, já que não haveria o suporte necessário para a estabilidade da cobertura.

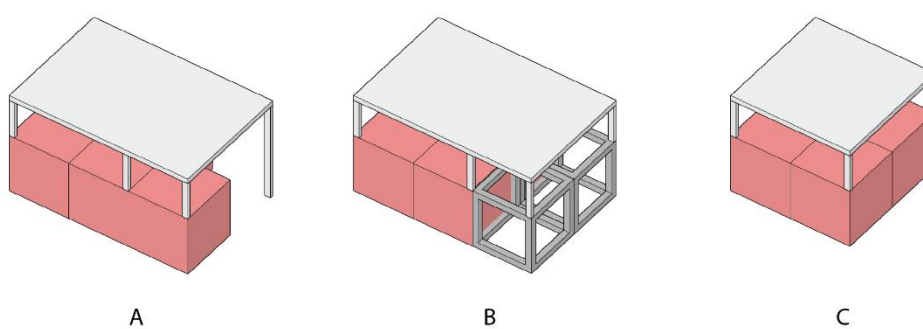
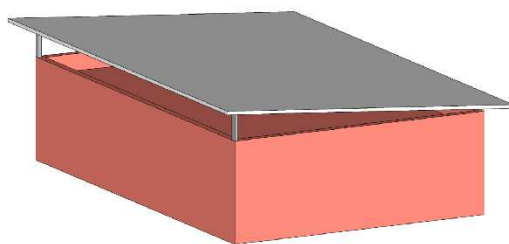
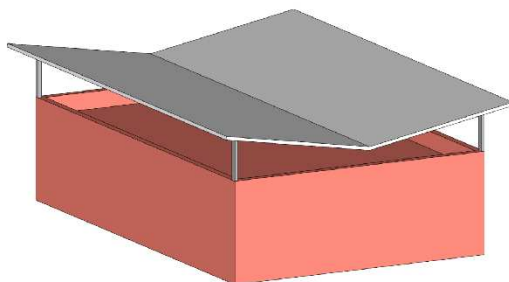


Figura 60: Representação esquemática das regras que definem a extensão da cobertura: A) ao menos um módulo que compõe o par está ativo; B) módulo ativo como estrutura; C) módulo ativo como área construída. Fonte: Autor.

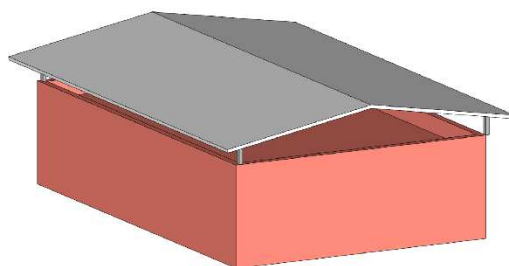
Apesar da estabilidade da forma projetada da cobertura, existem três possibilidades de variabilidade no seu formato de acordo com o número de águas e direção do caimento. Assim, há a possibilidade de cobertura de uma água com caimento para somente uma direção, cobertura de duas águas com caimento para as bordas e duas águas com caimento central.



Tipo 1: cobertura de uma água



Tipo 2: cobertura de duas águas
com caimento para o centro



Tipo 3: cobertura de duas águas
com caimento para fora

Figura 61: Variedades de cobertura permitidas. Fonte: Autor.

3.3.3.6 Inserção das esquadrias

As esquadrias podem ser inseridas a partir de qualquer eixo dos módulos ou das subdivisões gerada, que servem de referência para alvenarias. São localizados a partir do seu centro e das suas extremidades destes eixos. Nas extremidades, é respeitada uma distância mínima definida pelo projetista que será a boneca da porta ou da janela. Em termos de dimensões, todas as portas e janelas devem ter as mesmas dimensões.

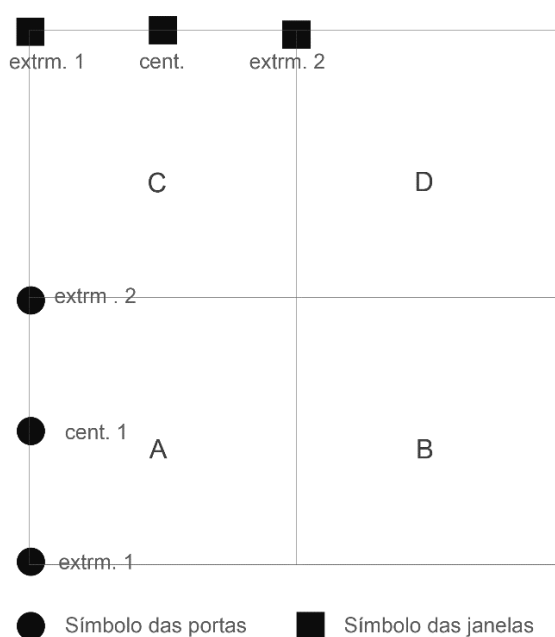


Figura 62: Posicionamento de portas e janelas: Fonte: Autor.

3.3.4 Cálculo dos custos e do tempo de execução das soluções

Para cálculo o custo das soluções de projeto geradas pelo sistema de design, foram utilizadas duas bases: o custo unitário básico por m^2 (cub/m^2), definido por padrão de construção e as referências do Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices (SINAPI).

O cub/m^2 é um índice de referência muito popular, no entanto a estimativa de custo a partir dos valores de referência do SINAPI é mais precisa. Sendo assim, uma vez que não foram encontrados valores que pudessem ser utilizados como parâmetro de referência para o custo das habitações, utiliza-se o custo gerado pelo SINAPI como

valor oficial e o custo estimado pelo cub/m² como valor de referência para estabelecer um parâmetro máximo.

3.3.4.1 Estimativa com base no CUB/m²

O cub/m² utiliza um valor padrão de referência por metro quadro, calculado e divulgado mensalmente pelos Sindicatos da Indústria da Construção estaduais conforme os critérios estipulados pela NBR 12.721. Os valores do metro quadrado são divididos de acordo com a unidade autônoma (tipo de construção e número de quartos), número de pavimentos e padrão de acabamento (MATTOS, 2006). Ressalta-se que o cub/m² não considera custos referentes às especificidades da construção, como o valor do terreno, fundações, paisagismo, elevadores, instalações e equipamentos diversos (MATTOS, 2006). A partir desse valor obtém-se a estimativa de custo a partir da multiplicação do cub/m² pela área construída da edificação.

O cub/m² não considera valor das fundações e nem das instalações prediais, nesse trabalho o valor encontrado pela multiplicação anterior é majorado por percentuais equivalente aos custos destas etapas de execução da obra. Para calcular a cobertura foi utilizado o custo do SINAPI, em detrimento ao cub/m², uma vez que a área da cobertura pode ser muito maior do que a área da habitação, o que pode distorcer o custo final.

Tabela 7: Fatores de custo das etapas da obra. Fonte: (MATTOS, 2006)

| | | |
|----|--|------|
| F1 | Fator de custo das fundações | 4.1 |
| F2 | Fator de custo das instalações elétricas | 4.8 |
| F3 | Fator de custo das instalações hidráulicas | 12.7 |
| F4 | Fator de custo da cobertura | 15 |

$$\text{Custo} = ((\text{cub} \times A) \times (F1 + F2 + F3 - F4)) + \text{custo da cobertura pelo SINAPI}$$

3.3.4.2 Estimativa com base nas referências da SINAPI

As referências do SINAPI são relatórios de insumos e composições disponíveis por Unidade da Federação. Os relatórios compreendem insumos, tais como materiais,

mão de obra e equipamentos, e composições. Os preços para insumos consideram custos com os Encargos Sociais Desonerado e Não Desonerado (CAIXA ECONÔMICA FEDERAL, 2021).

De acordo com a Caixa Econômica Federal (2021), o Decreto 7983/2013 estabelece as atribuições da Caixa Econômica Federal e do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE na gestão do SINAPI. A Caixa Econômica Federal é responsável pela base técnica de engenharia, processamento de dados e publicação dos relatórios de preços e custos. O IBGE atua na realização da pesquisa de preço, tratamento dos dados, formação e divulgação dos índices.

Os cálculos com base nos valores e composição do SINAPI são apresentados abaixo. Ressalta-se que para os casos em que os valores dos insumos não foram encontrados nas referências, foram utilizados valores aproximados a partir de pesquisas de mercado em Teresina – PI.

Tabela 8: Levantamento de custos realizado com base no SINAPI para o Estado do PI. Data de referência: 14/05/2021. *Inclusão de insumos fora dos preços da SINAPI.

| Levantamentos de custos | |
|---|---------------------------|
| Alvenaria De Vedação De Blocos Cerâmicos Furados Na Vertical De 9x19x39 | R\$ 49,74 /m ² |
| *Alvenaria De Vedação De Blocos Cerâmicos Furados Na Vertical De 9x19x39 c/ pingadeira de concreto | R\$ 67,20 /m ² |
| Alvenaria De Vedação De Blocos Cerâmicos Furados Na Vertical De 9x19x39 c/ vazamento | R\$ 43,47 /m ² |
| Alvenaria De Vedação De Blocos Cerâmicos Furados Na Vertical De 14x19x39 | R\$ 64,80 /m ² |
| *Alvenaria De Vedação De Blocos Cerâmicos Furados Na Vertical De 14x19x39 c/ pingadeira de concreto | R\$ 82,59 /m ² |
| Alvenaria De Vedação De Blocos Cerâmicos Furados Na Vertical De 14x19x39 c/ vazamento | R\$ 56,85/m ² |
| Alvenaria De Vedação De Blocos Cerâmicos Furados Na Vertical De 19x19x39 | R\$ 79,03 /m ² |

| | | |
|--|-------------|----------------------------|
| *Alvenaria De Vedação De Blocos Cerâmicos Furados Na Vertical De 19x19x39 c/ pingadeira de concreto | | R\$ 110,64 /m ² |
| Alvenaria De Vedação De Blocos Cerâmicos Furados Na Vertical De 19x19x39 c/ vazamento | | R\$ 69,13 /m ² |
| Alvenaria De Vedação Com Elemento Vazado De Concreto (Cobogó) De 7x50x50 | | R\$ 144,74 /m ² |
| *Impermeabilização de paredes com impermeabilizante incolor para tratamento de fachadas e telhas | | R\$ 25,35 /m ² |
| Kit De Porta-Pronta De Madeira Em Acabamento Melamínico Branco, Folha Leve Ou Média 70x210cm | | R\$ 641,61 /un |
| Kit De Porta-Pronta De Madeira Em Acabamento Melamínico Branco, Folha Leve Ou Média 80x210cm | | R\$ 646,50 /un |
| Kit De Porta-Pronta De Madeira Em Acabamento Melamínico Branco, Folha Leve Ou Média 90x210cm | | R\$ 651,38 /un |
| Janela De Alumínio Tipo Maxim-Ar, Com Vidros, Batente E Ferragens | | R\$ 609,37 /m ² |
| Laje Pré-Moldada Unidirecional, Bi apoiada, Para Forro, Enchimento Em Cerâmica, Vigota Convencional, Altura Total Da Laje (Enchimento+Capa) = (7+3) | | R\$ 141,90 /m ² |
| Laje Pré-Moldada Unidirecional, Bi apoiada, Para Forro, Enchimento Em Cerâmica, Vigota Convencional, Altura Total Da Laje (Enchimento+Capa) = (7+5) | | R\$ 157,63 /m ² |
| Laje Pré-Moldada Unidirecional, Bi apoiada, Para Forro, Enchimento Em Cerâmica, Vigota Convencional, Altura Total Da Laje (Enchimento+Capa) = (12+5) | | R\$ 161,96 /m ² |
| Contrapiso Em Argamassa Traço 1:4 (Cimento E Areia), Preparo Mecânico Com Betoneira E = 2cm | | R\$ 35,56 /m ² |
| Laje De Concreto Armado Moldada In Loco | Armação | R\$ 14,65 /kg |
| | Concretagem | R\$ 485,53 /m ³ |
| Laje De Concreto Armado Moldada In Loco 10cm | | R\$ 165,70 /m ² |
| Laje De Concreto Armado Moldada In Loco 12cm | | R\$ 198,90/m ² |

| | |
|---|----------------------------|
| Laje De Concreto Armado Moldada In Loco 15cm | R\$ 248,63 /m ² |
| Telhamento com telha ondulada de fibrocimento e = 6mm | R\$ 54,52 /m ² |
| Telhamento com telha de aço / alumínio e = 0,5mm | R\$ 71,94 /m ² |
| Viga Metálica Em Perfil Laminado Ou Soldado Em Aço Estrutural, Com Conexões Parafusadas | R\$ 14,08 /kg |
| Pilar Metálico Perfil Laminado/Soldado Em Aço Estrutural, Com Conexões Parafusadas | R\$ 13,37 /kg |

Tabela 9: Método para cálculo estimado do custo com base nos valores levantados a partir das referências do SINAPI. Fonte: Autor.

| Método de cálculo do custo da unidade habitacional | | |
|--|-------------------------------|--|
| C1 | Parede | área * custo do m ² |
| C2 | Impermeabilização das paredes | (área *2) * custo do m ² |
| C3 | Telhamento | (área * fator de inclinação) * custo do m ² |
| C4 | Laje maciça de concreto | volume da laje * custo do m ³ da concretagem |
| | | (volume da laje * taxa de armadura) * custo do kg da armação |
| | | custo da laje = concretagem + armação |
| C5 | Laje pré-fabricada | área * custo do m ² |
| C6 | Superestrutura | peso das vigas * custo do kg |
| | | peso dos pilares * custo do kg |
| | | custo da superestrutura = vigas + pilares |
| C7 | Portas | nº de portas * custo da unidade |
| C8 | Janela | área do vão da janela * custo do m ² |

| | | |
|-----|-------------------------|----------------------|
| C9 | Custo total | C1+C2+C3+C4+C6+C7+C8 |
| C10 | Infraestrutura | custo total * f1 |
| C11 | Instalações elétricas | custo total * f2 |
| C12 | Instalações hidráulicas | custo total * f3 |
| C13 | Custo final da unidade | C9+C10+C11+C12 |

3.3.4.3 Estimativa de tempo e custo de execução

Para realizar a estimativa de custos foram utilizados os valores oriundos das referências de custos de composição analítico do SINAPI, onde é possível considerar o valor da hora de trabalho dos profissionais envolvidos e o custo associado por metro quadrado de determinado componente construtivo. No exemplo abaixo é possível verificar que para construir 1m² de uma alvenaria de vedação de blocos cerâmicos na vertical de 9cmx19cmx39cm, é necessário 0,59 horas de um pedreiro e 0,295 horas de um servente.

Com base nesses valores, calcula-se o tempo total necessário (T) para levantamento de toda a obra com base no produto da área (A) pelo tempo necessário por m² $T = (A \times t/m^2)$. Nos casos em que houver mais de um profissional envolvido, por exemplo, um pedreiro e um auxiliar, utiliza-se o maior valor de tempo, no caso deste exemplo, o do pedreiro. Dependendo do componente construtivo, em detrimento do cálculo por área, poderá ser considerado o volume ou massa. Em seguida, é feito o cálculo do custo do profissional por m² (c). Multiplica-se o valor da hora do profissional (p) envolvido pelo total tempo necessário por m², em seguida soma-se o valor de todos os profissionais envolvidos na execução do componente. $c = (p_1 \times t_1/m^2) + (p_n \times t_n/m^2)$. Assim, o custo total de execução pode ser estimado a partir do produto do custo do profissional pelo tempo total de execução ($T \times c$).

| VÍNCULO : CAIXA REFERENCIAL | | | | | | |
|---|----------------------|---|-------|-----------|------------|-------|
| TIPO1 : 0630 - ALVENARIA DE TIJOLOS CERAMICOS | | | | | | |
| 87471 | ALVENARIA DE VEDAÇÃO | DE BLOCOS CERÂMICOS FURADOS NA VERTICAL DE 9X19X39CM | M2 | | | |
| (ESPESURA 9CM) DE PAREDES COM ÁREA LÍQUIDA MENOR QUE 6M² SEM VÃOS E ARGAM | | | | | | |
| ASSA DE ASSENTAMENTO COM PREPARO EM BETONEIRA. AF_06/2014 | | | | | | |
| I | 34557 | TELA DE AÇO SOLDADA GALVANIZADA/ZINCADA PARA ALVENARIA, FIO D = *1,20 A 1, M | CR | 0,7850000 | 3,05 | 2,39 |
| 70* MM, MALHA 15 X 15 MM, (C X L) *50 X 7,5* CM | | | | | | |
| I | 37395 | PINO DE AÇO COM FURO, HASTE = 27 MM (AÇO DIRETA) | CENTO | AS | 0,0094000 | 38,46 |
| I | 37592 | BLOCO CERÂMICO DE VEDAÇÃO COM FUROS NA VERTICAL, 9 X 19 X 39 CM - 4,5 MPA | UN | CR | 13,3500000 | 2,09 |
| (NBR 15270) | | | | | | |
| C | 87292 | ARGAMASSA TRAÇO 1:2:8 (EM VOLUME DE CIMENTO, CAL E AREIA MÉDIA ÚMIDA) PARA M3 | CR | 0,0104000 | 433,84 | 4,51 |
| EMBOCO/MASSA ÚNICA/ASSENTAMENTO DE ALVENARIA DE VEDAÇÃO, PREPARO MECÂNICO | | | | | | |
| COM BETONEIRA 400 L. AF_08/2019 | | | | | | |
| C | 88305 | PEDREIRO COM ENCARGOS COMPLEMENTARES | H | C | 0,5900000 | 17,79 |
| C | 88316 | SERVENTE COM ENCARGOS COMPLEMENTARES | H | C | 0,2950000 | 13,88 |
| EQUIPAMENTO : 0,01 0,0201531 % | | | | | | |
| MATERIAL : 38,63 77,6501413 % | | | | | | |
| MÃO DE OBRA : 11,09 22,3095525 % | | | | | | |
| OUTROS : 0,01 0,0201531 % | | | | | | |
| TOTAL COMPOSIÇÃO : 49,74 100,0000000 % - ORIGEM DE PREÇO: AS | | | | | | |
| 87472 | ALVENARIA DE VEDAÇÃO | DE BLOCOS CERÂMICOS FURADOS NA VERTICAL DE 9X19X39CM | M2 | | | |
| (ESPESURA 9CM) DE PAREDES COM ÁREA LÍQUIDA MENOR QUE 6M² SEM VÃOS E ARGAM | | | | | | |
| ASSA DE ASSENTAMENTO COM PREPARO MANUAL. AF_06/2014 | | | | | | |
| I | 34557 | TELA DE AÇO SOLDADA GALVANIZADA/ZINCADA PARA ALVENARIA, FIO D = *1,20 A 1, M | CR | 0,7850000 | 3,05 | 2,39 |
| 70* MM, MALHA 15 X 15 MM, (C X L) *50 X 7,5* CM | | | | | | |
| I | 37395 | PINO DE AÇO COM FURO, HASTE = 27 MM (AÇO DIRETA) | CENTO | AS | 0,0094000 | 38,46 |
| I | 37592 | BLOCO CERÂMICO DE VEDAÇÃO COM FUROS NA VERTICAL, 9 X 19 X 39 CM - 4,5 MPA | UN | CR | 13,3500000 | 2,09 |
| (NBR 15270) | | | | | | |

Figura 63: Tabela com referência de custos de composição analítico. Fonte: (SISTEMA NACIONAL DE PESQUISA DE CUSTOS E ÍNDICES DA CONSTRUÇÃO CIVIL, 2021)

Dentro da plataforma, é possível indiciar o número de profissionais envolvidos na execução de determinada parte da edificação. Assim, ao ser informado este número, o tempo de execução e o custo total da obra podem ser alterados automaticamente e proporcionalmente ao número de profissionais envolvidos.

3.4 Implementação do sistema de geração de projetos (BIM + modelagem algorítmica-paramétrica)

Nesta seção é apresentado o subsistema de geração e seu desenvolvimento. Trata-se de um sistema paramétrico voltado ao auxílio do projeto, baseado na comunicação entre o ambiente de modelagem algorítmico-paramétrico Grasshopper para o programa de modelagem 3D Rhinoceros e o programa BIM Autodesk Revit, a partir da versão beta do plugin *Rhino Inside Revit*. Dentro do ambiente de modelagem algorítmico-paramétrico foi utilizada a linguagem de programação visual do plugin Grasshopper em conjunto com a linguagem de programação C#. O plugin Rhino Inside Revit é um plugin de tradução de interface de programação das aplicações que permite a conversão de fluxos de trabalho entre os dados do programa Revit e a geometria e os metadados do programa Rhinoceros (DAVIDSON e IRAN-NEJAD, 2019).

Estas ferramentas foram escolhidas para o desenvolvimento do sistema de geração desta pesquisa devido à familiaridade do autor com as ferramentas. No

entanto, é importante ressaltar que o processo de conexão entre plataformas BIM e ambientes de modelagem algorítmica pode ocorrer de diversas outras formas a partir de outros plugins fornecidos por diferentes empresas ou de forma totalmente independente a partir de linguagens de programação mais robustas.

Como um ambiente de auxílio de projeto, esse sistema não gera soluções automatizadas, uma vez que o seu funcionamento depende da interação e das escolhas do projetista. Dito isso, o sistema de geração é responsável por automatizar uma série de processos de projeto e manipulação de dados da construção que agilizam a visualização de soluções. Sendo assim, este sistema foi desenvolvido para exibir a solução de projeto em tempo real de forma dinâmica e amigável, enquanto os parâmetros são manipulados pelo projetista, a fim de agilizar a tomada de decisão do projetista que idealmente, em conjunto com o usuário final da habitação, irá avaliar e julgar se a solução desenvolvida é adequada.

3.4.1 Funcionamento do sistema de geração

O sistema de geração funciona a partir de três grupos de parâmetros. Parâmetros de modelo, parâmetros de projetos e parâmetros de dados dos componentes construtivos, sendo este último fornecidos pelos objetos BIM criados dentro do programa Revit. Os valores destes parâmetros são filtrados, conforme as regras e restrições definidas pela lógica projetual e utilizados para o processamento automático de ações que criarão as geometrias de referência necessárias para a construção do modelo tridimensional dentro do programa Rhinoceros 3D. Simultaneamente estas informações retornam para o programa Revit como referências para a construção de um modelo paramétrico central. As informações do modelo construído em conjunto com os dados provenientes dos objetos BIM alimentam a parte do código responsável por calcular e exibir os quantitativos do projeto. O diagrama exibido na Figura 30 representa os principais componentes deste modelo e as suas conexões funcionais internas.

Partindo-se de um ponto inicial, são definidas as coordenadas do posicionamento do modelo dentro do plano de trabalho do programa Rhinoceros 3D. A partir deste ponto, são criadas as intersecções que irão definir os pontos iniciais utilizados para a construção dos pares de módulos que compõem a base compositiva do modelo.

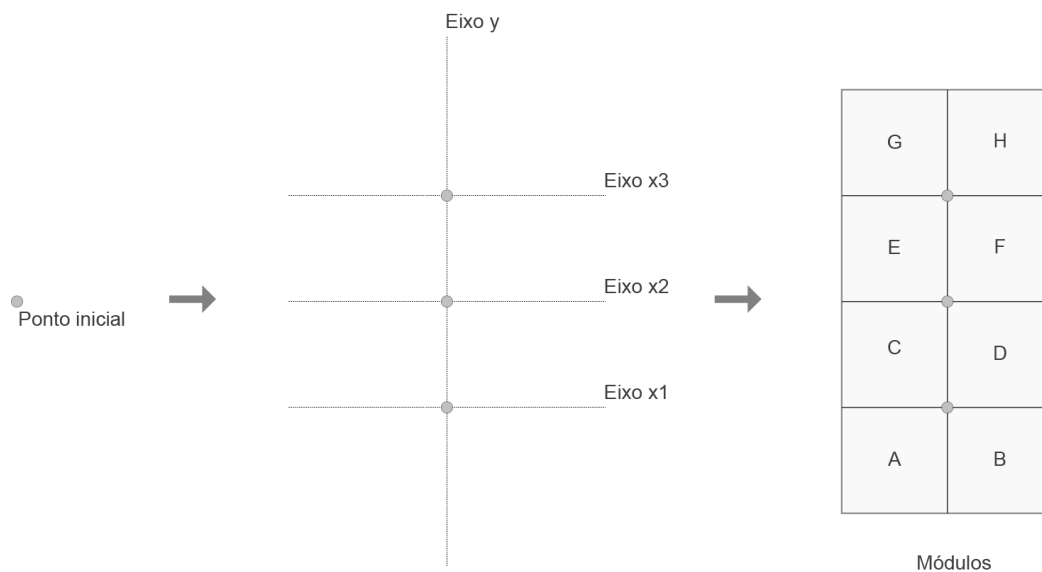


Figura 64: Representação esquemática mostrando de forma simplificada a criação dos módulos.

Fonte: Autor.

Para a executar as subdivisões, identifica-se o módulo e o vértice deste mesmo módulo em que a subdivisão deverá ocorrer. A identificação deste canto e do módulo pode ocorrer de forma direta ou indireta dependendo de qual função será atribuída ao espaço gerado. Por exemplo, na criação de uma subdivisão para construção de um banheiro, deve-se indicar diretamente a partir da manipulação o módulo e o vértice em que o banheiro será posicionado. Porém, para a construção da área de serviço a manipulação dos parâmetros define a sua relação com o banheiro, por exemplo, se esta será posicionada no mesmo módulo que o banheiro ou no módulo hidráulico adjacente. Neste caso, a definição do módulo e do vértice ocorre de forma indireta

conforme o processamento automático das regras da lógica dentro do próprio algoritmo.

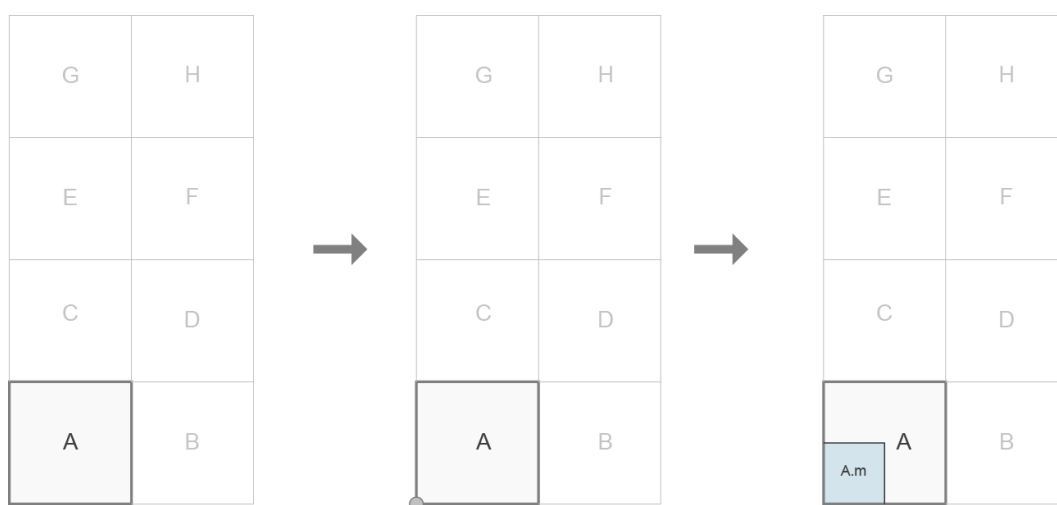


Figura 65: Processo de subdivisão. Fonte: Autor.

Após a construção dos módulos e implementação das subdivisões, o algoritmo executa a sua etapa mais complexa, a exclusão de eixos sobrepostos. Nesta etapa, as rotinas do código são responsáveis por identificar os eixos sobrepostos, interpretar quais destes devem ser excluídos e qual deve ser mantido para o correto funcionamento do modelo. A Figura 66 representa esquematicamente um exemplo desse processo. Conforme pode ser visto no exemplo, o módulo posicionado mais abaixo na figura gera o eixo 01, o módulo mais acima na figura gera o eixo 02 e a subdivisão feita dentro do primeiro módulo gera dois outros eixos, 03 e 04. Percebe-se que todos estes eixos estão sobrepostos. Logo, uma regra foi escrita informando que sempre que esta situação ocorrer, os eixos gerados em função da subdivisão devem ser respeitados e por isso mantidos enquanto os outros devem ser excluídos.

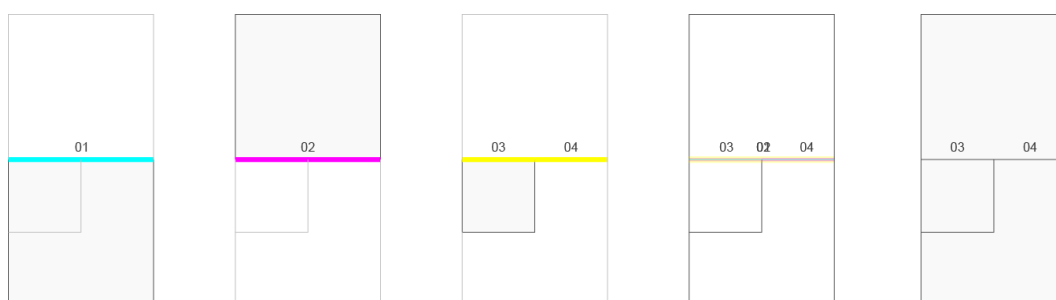


Figura 66: Representação esquemática de um exemplo de exclusão de eixos sobrepostos. Fonte: Autor.

Por fim, uma vez que os eixos foram excluídos, os eixos sobrepostos são organizados de acordo com o seu posicionamento conforme suas coordenadas centrais x e y para em seguida serem identificados com um número conforme sua posição. Os eixos são organizados sempre da esquerda para a direita e de cima para baixo, conforme mostra a Figura 67. Os eixos são então utilizados para gerar a geometria de referência também utilizada para construir o modelo dentro do programa BIM.

| | 01 | | 02 | |
|----|----|----|----|----|
| 11 | G | 15 | H | 19 |
| | 03 | | 04 | |
| 12 | E | 16 | F | 20 |
| | 05 | | 06 | |
| 13 | C | 17 | D | 21 |
| | 07 | | 08 | |
| 14 | A | 18 | B | 22 |
| | 09 | | 10 | |

Figura 67: Organização e identificação dos eixos dos módulos. Fonte: Autor.

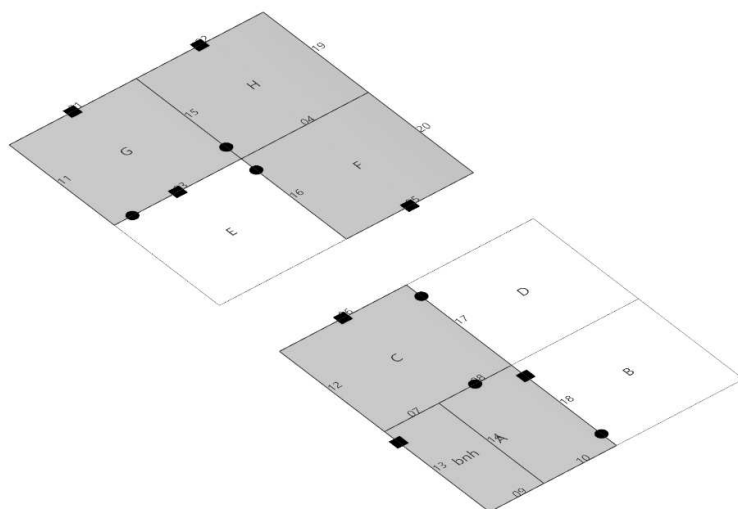


Figura 68: Referências para a construção do modelo central a partir dos módulos e eixos construídos pelo algoritmo. Fonte: Autor.

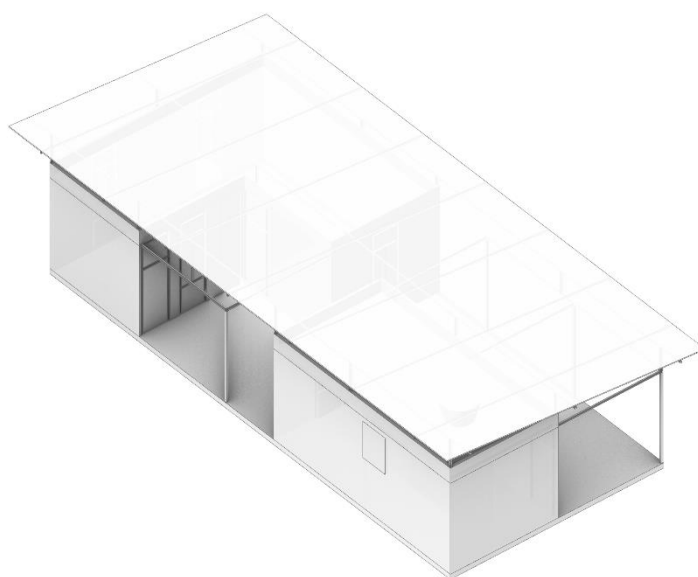


Figura 69: Implementação dos componentes construtivos do modelo central com base nas referências definidas. Fonte: Autor.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para aferir os resultados foram propostos três métodos. Primeiro, estimativa quantitativa da variabilidade a partir da estimativa do número de soluções possíveis que o algoritmo é capaz de gerar utilizando um cálculo de análise combinatória. Em segundo, avaliação da relação entre variabilidade de soluções geradas a partir do uso da plataforma com controle de custo e área, a partir de projetos desenvolvidos pelo autor. Terceiro, análise qualitativa da usabilidade e funcionalidade da plataforma a partir de sua operação por outros pesquisadores durante a realização de um exercício praticado dentro do Laboratório de Modelagem Digital (Nó.Lab) do Departamento de Arquitetura e Urbanismo da UFV.

4.1 Estimativa quantitativa da variabilidade

É proposto o cálculo combinatório de todos os parâmetros de projeto a partir da multiplicação de suas respectivas cardinalidades (número de elementos de um conjunto). Por exemplo, a área molhada adicional pode ser localizada em qualquer um dos módulos entre A e H. Logo, a cardinalidade do parâmetro “módulo da área molhada adicional” é 8. A lista com todos os parâmetros e suas respectivas cardinalidades está disposta no Apêndice B. A seguir, o cálculo combinatório dos possíveis arranjos espaciais é apresentado, desconsiderando-se parâmetros dimensionais.

Cálculo combinatório considerando possíveis arranjos espaciais

$$\text{Total} = (4)^{14} \times (2)^{22} \times (6)^2 \times 8 \times 7 \times 3$$

$$\text{Total} = 6.809.442.636.584.189.952$$

4.2 Avaliação da relação entre variabilidade e custo

A fim de testar a possibilidade de variabilidade de soluções com controle de custos, foi proposto o desenvolvimento de cinco soluções diferentes para atender ao mesmo programa habitacional dentro de um alcance de custo específico. A partir deste exercício, são apresentados cinco projetos gerados com a plataforma desenvolvida, planejados a partir de um mesmo programa base. As áreas definidas no programa são aproximações do que é estabelecido na Tabela 10. Sendo assim, os projetos finais deveriam ter aproximadamente 60m² de área construída, contando com área de circulação. Foi arbitrado um custo com alcance de R\$75.000,00 até R\$82.000,00 por habitação. Os projetos foram pensados para uma família composta por um casal jovem com 2 filhos, onde um dos membros do casal trabalha em casa e por isso precisava de um pequeno escritório com entrada independente para receber eventuais usuários. As cinco soluções foram desenvolvidas e documentadas em aproximadamente 3 horas respeitando os intervalos de custo e área estabelecidos.

Tabela 10: Programa base para geração das habitações. Fonte: Autor.

| |
|-----------------------------------|
| Programa (Áreas estimadas) |
| Sala + cozinha = 25m ² |
| Quartos = 10m ² |
| Banheiro = 4m ² |
| Escritório = 8m ² |
| Total estimado = 60m ² |
| Custo máximo = R\$ 82.000,00 |
| Terreno: 10m x 25m |

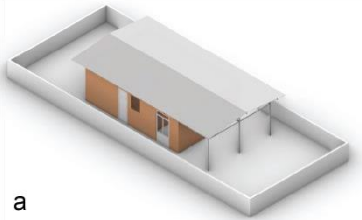
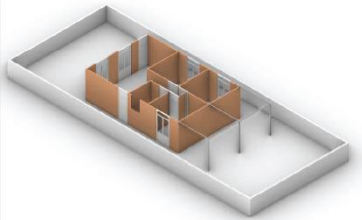

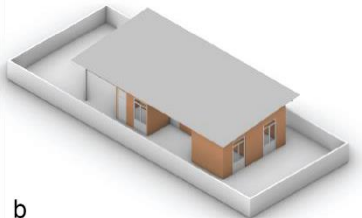
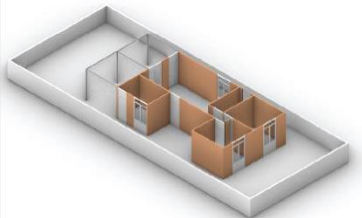

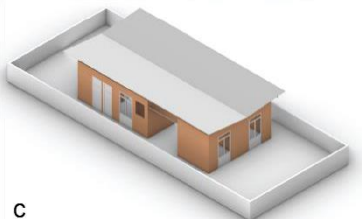
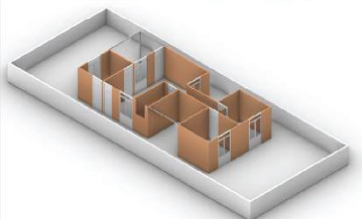

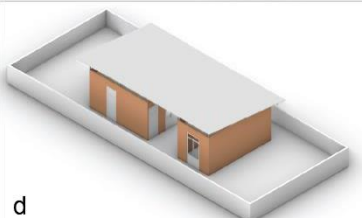
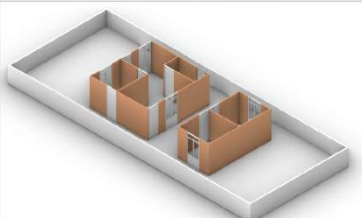

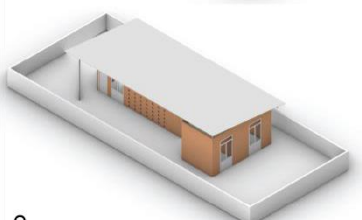
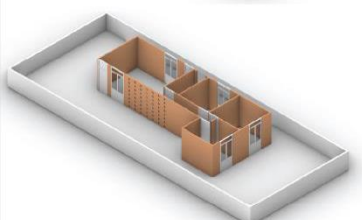
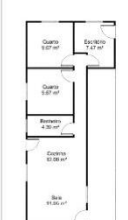
| | | | |
|--|--|---|-----------------------------------|
| <p>a</p>  |  |  | <p>A = 61,44 C = 76048,52</p> |
| <p>b</p>  |  |  | <p>A = 60,23 C = 80553,73</p> |
| <p>c</p>  |  |  | <p>A = 61,44 C = 80896,58</p> |
| <p>d</p>  |  |  | <p>A = 58,88 C = 73574,31</p> |
| <p>e</p>  |  |  | <p>A = 63,07 C = 77293,12</p> |

Figura 70 Resultados oriundos do exercício de controle de custos da pesquisa. A = área construída dos projetos em m²; C = estimativa de custo da construção, com base nas referências da SINAPI em reais. Fonte: Autor.



Figura 71: Concepção de uma das quadras do projeto ocupada por habitações desenvolvidos a partir da plataforma desenvolvida. Fonte: Autor.



Figura 72: Concepção de uma das quadras do projeto ocupada por habitações desenvolvidos a partir da plataforma desenvolvida. Fonte: Autor.

4.3 Análise da usabilidade e funcionalidade

Para validar a usabilidade e o funcionamento da plataforma desenvolvida foi realizado um exercício com seis pesquisadores do Laboratório de Modelagem Digital (Nó.Lab) do Departamento de Arquitetura e Urbanismo da UFV. O grupo foi composto por estudantes de graduação e arquitetos já graduados, dentre os quais mestrandos do PPG.au/UFV, com experiência variada de uso dos softwares utilizados nessa pesquisa. No entanto, ressalta-se que este é um estudo preliminar devido ao número reduzido de participantes (6 pesquisadores) e à baixa heterogeneidade dos perfis em termos de tempo de formatura, experiência com projetos e familiaridade com os processos digitais envolvidos na atividade.

O exercício foi realizado remotamente utilizando a plataforma Google Meet e foi monitorado pelas Professoras coordenadoras do laboratório. Durante o exercício foram realizadas as seguintes atividades: (1) apresentação inicial de introdução do tema de pesquisa e do funcionamento da plataforma para os pesquisadores com duração de 40 minutos; (2) sorteio de um perfil familiar gerado randomicamente para cada pesquisador com informações básicas sobre os usuários e de um lote da quadra E do Residencial Parque Brasil. Essas informações foram a base para que os pesquisadores participantes formulassem os programas funcionais das habitações; (3) realização da atividade de projeto por parte dos pesquisadores utilizando a plataforma apresentada com duração de 2 horas e 30 minutos aproximadamente; (4) apresentação dos resultados e das considerações com duração de 20 minutos no total.

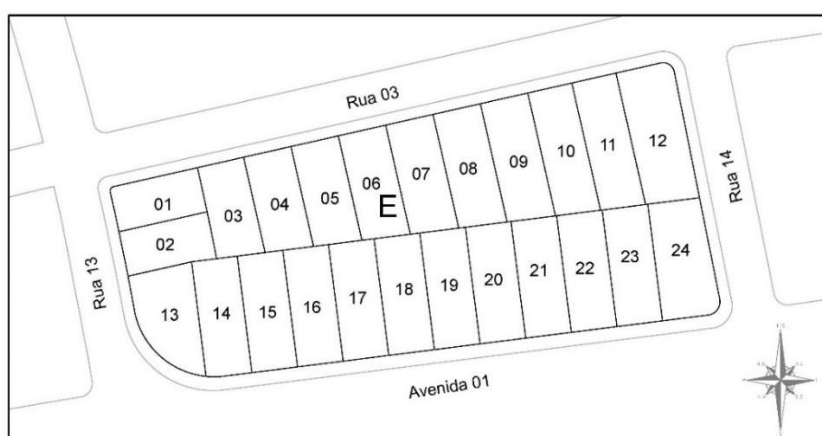


Figura 73: Lotes da quadra E do Residencial parque Brasil. Para os fins da pesquisa os lotes 01 e 02 foram considerados como um lote único. Os desenhos do projeto foram cedidos pela Prefeitura de Teresina – PI. Fonte: Autor.

No pior cenário de usabilidade, nenhum dos pesquisadores conseguiria desenvolver uma habitação válida por dificuldade na compreensão e manipulação dos parâmetros, enquanto no cenário ideal todos seriam capazes de desenvolver uma solução válida. Em termos de funcionalidade, no melhor cenário nenhum erro de escrita seria encontrado no script, todas as funções ocorreriam conforme planejado pelo autor e as regras escritas impediriam que soluções fora da linguagem fossem possíveis. Sobre a linguagem arquitetônica, consideram-se falhas, casos em que os pesquisadores não expressassem satisfação com seus próprios resultados ou manifestassem descontentamento com a estética proporcionada pela linguagem. Em contrapartida um manifesto positivo sobre esses quesitos atestaria um bom desempenho da linguagem arquitetônica.

Em termos de usabilidade da plataforma, todos os pesquisadores conseguiram utilizar e compreender a função dos parâmetros e como usá-los para obter resultados, dentro de um curto período. A principal limitação apontada sobre a usabilidade foi a ordenação de alguns parâmetros que induziam os usuários do sistema a definir partes específicas do projeto antes de um estudo da volumetria da edificação. O retorno a estas definições específicas para modificações posteriores, gerava necessidade de retrabalho. Uma possível alteração na ordem dos parâmetros, provavelmente já tornaria seu manuseio e o processo de projeto mais fluido.

Em termos de funcionalidade, a maior parte das funções comportou-se como previsto. No entanto, foram identificados erros na escrita do algoritmo que prejudicaram alguns resultados, como também a fluidez do projeto. Além disso, a maioria dos pesquisadores sugeriu adicionar alguma função nova. Em síntese, a realização do exercício indicou que há 2 principais melhorias nas funções do código. Primeiro, na correção de erros no algoritmo que geraram comportamentos inesperados e indevidos. Dois deles receberam maior destaque pois impactaram diretamente a usabilidade e a geração de soluções durante o processo. O primeiro erro impossibilitava a quebra de eixos ao integrar um ou mais módulos. O segundo, sempre resetava as configurações das esquadrias quando a numeração dos eixos era alterada. O segundo ponto, consiste na alteração ou criação de novas regras no

algoritmo para maior controle dos resultados e redução de soluções inadequadas, como por exemplo, número excessivo de ângulos das alvenarias, o que dificulta a construção. De forma geral, percebe-se que o algoritmo é capaz de gerar resultados adequados em relação à funcionalidade espacial, porém os inadequados ainda não são descartados.

Sobre a linguagem arquitetônica das habitações, é possível afirmar, que para uma primeira avaliação, mostrou-se bem-sucedida. De forma geral, a escolha das soluções construtivas da linguagem gerou uma percepção positiva nos pesquisadores, que concordaram com as justificativas apresentadas na escolha dos materiais e componentes construtivos. Além disso, a maioria dos pesquisadores participantes mostrou-se satisfeitos com os resultados. Os resultados dos projetos gerados pelos pesquisadores estão listados no Apêndice C.

4.4 Discussão

Essa pesquisa se propôs a desenvolver uma plataforma de projetos baseada na integração entre a tecnologia BIM e a modelagem algorítmico paramétrica, que servisse como um potencial subsistema de geração de um sistema de design para a CM de habitações de interesse social. Os resultados apresentados mostram que a manipulação dos dados da construção a partir de rotinas específicas é capaz de auxiliar projetistas, com relativo sucesso, em desenvolver soluções que atendam demandas específicas, com controle dos custos e tempo execução da obra, em um curto período. Ainda, gerando um modelo central, que possibilita a integração entre disciplinas de projeto e geração de documentação para processo de produção.

Conforme foi demonstrado a plataforma de projetos é capaz de gerar grande número de variações de projeto a partir da manipulação dos seus parâmetros. Este resultado demonstra que o auxílio da modelagem algorítmico paramétrica confere elasticidade suficiente à modelagem dos dados da construção para atender demandas específicas. Neste caso, mesmo utilizando ferramentas mais simples, como o ambiente de programação visual Grasshopper. A manipulação e modelagem de dados utilizando linguagens mais robustas e sistemas mais complexos podem ampliar ainda mais as possibilidades e o controle dos resultados.

Seguido da variabilidade, foi possível verificar que a visualização dos dados oriundos da plataforma BIM, em tempo real, auxiliou o desenvolvimento de projetos

com controle de custos, sendo a percepção do impacto das decisões de projeto no custo total da construção apontada com um dos pontos mais positivos da plataforma pelos pesquisadores que testaram a usabilidade e funcionalidade do sistema de projetos. Conforme foi visto na análise da relação entre variabilidade e controle de custos, a plataforma permitiu o desenvolvimento de cinco soluções para um programa específico com o mesmo alcance de custos máximo e mínimo. O tempo necessário para gerar estas soluções foi de aproximadamente 2 horas corridas, contando com o tempo necessário para a produção da documentação.

Para exemplificar como a plataforma agiliza a tomada de decisões, a simples ação de um clique, alterou a especificação do bloco cerâmico que iria compor todas as alvenarias de 14x19x29 para 9x19x29, o que possibilitou averiguar uma redução no custo total da obra de R\$ 3.233,02 em menos de 1 segundo. Além do auxílio na tomada de decisões específicas durante o projeto, o uso contínuo da plataforma permitiu identificar rapidamente que o aumento do peso das estruturas metálicas era muito desproporcional ao aumento dos custos na construção, o que poderia levar a reavaliar o seu uso como solução construtiva. Embora, também foi possível perceber que o mesmo aumento, pouco impactava na velocidade com que as estruturas metálicas eram executadas, mantendo-se sempre como um dos elementos que menos tomavam tempo na construção. Esse tipo de identificação em tempo real permite avaliar com maior precisão a relação custo-benefício das soluções construtivas permitidas pela linguagem.

Por fim, além de sua aplicação dentro do contexto deste trabalho, enxerga-se potencial para aplicação da plataforma em outros contextos além da aplicação em conjuntos habitacionais de baixa densidade. Este tipo de tecnologia pode ser utilizado para auxiliar arquitetos na prestação de assistência técnica para famílias vulneráveis socioeconomicamente em diferentes contextos, tendo em vista que é oferecida a possibilidade de variação nas dimensões e forma do terreno, dentro do algoritmo. Pode-se ainda adaptar esta plataforma para que esta seja utilizada pelos próprios usuários finais para o desenvolvimento de residências simples. Ressalta-se que para que isso se concretize, seria necessária sua implementação em uma plataforma online e o aumento das regras e restrições para permitir o controle das soluções por parte dos usuários, já que atualmente a plataforma foi desenvolvida para intermédio de profissionais especializados. Ainda, o trabalho demonstrou que é possível controlar

orçamentos em tempo real em projetos com tecnologia de produção tradicionais, caracterizando-se como uma possibilidade interessante para atender o mercado na indústria AEC.

5 CONCLUSÃO

Essa dissertação possui como objetivo final contribuir para sistematização dos processos de projetos voltado para a CM de habitações de interesse social. Para isso, a pesquisa focou em apresentar os processos por trás do desenvolvimento de uma plataforma de projetos de habitações de interesse social unifamiliares baseada na comunicação entre a modelagem algorítmico-paramétrica e a modelagem de dados BIM.

Ressalva-se que o trabalho tem como foco a melhoria das configurações de forma e espaços internos individuais das habitações e, por isso, se utiliza de uma ocupação e parcelamento do solo já existente que não reflete conceitos de urbanismo sustentável e novo urbanismo, devido à baixa densidade de distribuição das habitações e a exigência de recuos laterais e frontais, que geram problemas de mau uso do solo e áreas inabitáveis, assim como baixo índice de áreas verdes. No entanto, buscou-se trazer melhorias a estas condições já existentes dentro de um exemplo real de projeto a partir da CM. Sendo assim, a estratégia também poderia ser aplicada a outras formas de ocupação do território, alinhados com conceitos de habitação coletiva e maior adensamento das propriedades, contribuindo ainda mais para a qualidade habitacional a partir da oferta de quantidades maiores de espaços verdes em conjunto com uma densidade mais adequada ao fornecimento de serviços e equipamentos públicos.

Dada esta ressalva, conclui-se que há potencial para a CM de habitações de interesse social a partir do uso integrado dessas duas tecnologias. Foi visto que a manipulação de dados a partir de códigos e algoritmos possibilita a entrega de variabilidade de soluções em um curto espaço de tempo devido à agilidade na tomada de decisão junto à centralização e o controle das informações, referentes ao custo e ao tempo de execução, atendendo os requisitos necessários à CM. A seguir, são apresentadas as principais contribuições da pesquisa ao tema da CM de habitações de interesse social.

Partindo dos fundamentos teóricos, foi possível concluir que a CM equivale a um sistema complexo formado por diversos núcleos interligados cujo sucesso depende da comunicação entre essas partes, dentre as quais o subsistema de projetos possui papel central na indústria AEC. Tal classificação contribui para definir formalmente as partes que compõem a CM enquanto sistemas e, assim, possibilitar que futuros estudos sobre o tema definam recortes consistentes conforme os subsistemas abordados na pesquisa e suas respectivas interfaces. Também, contribui para que sejam feitos levantamento de estudos já existentes conforme esta classificação, o quanto estes estudos adentram as interfaces de seus recortes e qual dos subsistemas possuem mais ou menos relevância atualmente de acordo com o número de publicações. Além disso, empreendimentos que adotam a CM enquanto estratégia, podem ser analisados a partir dessa abordagem sistêmica para que sejam detectados quais subsistemas e respectivas partes estão mais adequados à estratégia. Ainda no referencial teórico, a pesquisa verificou o estado-da-arte e investigações que relacionam o BIM com a CM, concluindo que existem lacunas a serem preenchidas, principalmente no que diz respeito ao uso das capacidades do BIM de gerenciamento de dados da construção, de forma a favorecer o processo de projetos customizados em massa.

Em sua etapa prática, a pesquisa contribui ao demonstrar que a tecnologia BIM, além de fornecer dados para alimentar as rotinas de projeto, também recebe os dados de saída oriundos deste processo para gerar um modelo central que permite a integração com outras plataformas de projeto de outras disciplinas (estrutural, instalações prediais e etc.) e a centralização das informações para auxiliar a comunicação dos subsistemas de logística e produção, permitindo o controle e manipulação dos dados da construção durante todo o processo de projeto e produção até a entrega final. Ainda, embora não seja o objetivo dessa pesquisa, foi possível observar que o modelo central facilita sua comunicação ao usuário final, podendo ser ainda mais efetiva no caso de conexão em tempo real com sistemas de realidade virtual, como foi feito, neste caso, utilizando o software Twinmotion. Também, nota-se que a análise das características culturais construtivas locais e sua respectiva incorporação ao algoritmo, sugere que o uso de rotinas de programação para o desenvolvimento de projetos não está associado necessariamente a uma linguagem arquitetônica generalista, cujos resultados não corresponda a identidade local.

Ademais, o trabalho também apresenta a sistematização do processo de desenvolvimento de um sistema de projetos voltado para a CM de habitações de interesse social, que pode servir como base para outros trabalhos, contemplando: (1) a formulação de uma linguagem projetual com base em uma tecnologia de projeto específica e de um contexto específico utilizando informações demográficas e geográficas próprias do local para a escolha das tecnologias construtivas e das relações formais e funcionais do universo de soluções possíveis; (2) a aplicação da linguagem no sistema de geração com base nas tecnologias já mencionadas; (3) processo para inclusão dos dados relativos ao custo e ao tempo de execução; (4) o protótipo de uma interface de usuário com informações de dados relativos ao projeto como o custo e o tempo de execução para auxílio do processo de projeto e rapidez na tomada de decisão.

No entanto, existem limitações e melhorias a serem consideradas. Sobre as ferramentas utilizadas, a integração entre o programa Revit e o programa Rhinoceros ocorreu a partir de uma versão beta do plugin externo Rhino Inside Revit, o qual apresentou algumas limitações e instabilidades que dificilmente poderiam ser consideradas em um caso real. Outra limitação de ferramenta foi o uso da programação visual no ambiente do Grasshopper, que não possibilita o uso de rotinas recursivas. Acredita-se que o uso de rotinas de automatização dos processos de projeto, escritas com uma linguagem mais robusta, assim como uma conexão independente entre as tecnologias, permita resultados mais estáveis e completos. Além disso, o uso de diversos *softwares* diferentes, com uma janela própria em cada, pode tornar o processo de projeto confuso em determinados momentos.

Outra limitação se encontra na consideração dos fatores relativos ao custo das habitações. Alguns itens, como acabamentos da cozinha, peças sanitárias e outros itens oriundos de um maior detalhamento de projeto só poderiam ser entregues com maior refinamento do código. A falta destes itens pode causar algumas distorções nos resultados de custo. Ainda, ressalta-se que não foram inclusos métodos de avaliação qualitativa das soluções. Assim, o projetista é responsável por mediar o código e avaliar analogicamente as soluções. Ainda, embora a plataforma contribua para o controle de custos na etapa de projetos, os custos de execução, geralmente reduzidos pela repetição não são contemplados devido a escolha de um sistema construtivo tradicional.

Conforme visto anteriormente, a pesquisa considera que por se tratar de um produto com largo tempo de vida útil e custo, junto às limitações temporais e técnicas, não é recomendado que a plataforma seja operada por leigos. Ressalta-se que é possível que a plataforma seja menos amigável do que a percepção obtida. Isso porque a curva de aprendizado pode ser maior para arquitetos com mais experiência ou mais acostumados aos processos digitais de projeto. No entanto, pondera-se que as questões levantadas no resultado do exercício proposto para testagem da usabilidade e funcionalidade devem ser analisadas com certa relatividade em função do baixo número de pesquisadores que testaram a plataforma.

No que diz respeito ao código escrito, foram implementadas melhorias com base nos resultados do exercício. As regras de configuração e adjacência das áreas molhadas que definem o núcleo hidráulico foram simplificadas a partir da remoção das predefinições de funções destas áreas. Essas modificações almejam fornecer maior liberdade ao projetista usuário do código durante a definição do núcleo hidráulico e suas subdivisões internas. Os erros técnicos de escrita do código detectados e que geravam limitações de uso, também foram corrigidos. Por fim, foi alterada a ordem de apresentação de alguns grupos de parâmetros afim de deixar o funcionamento do código e o fluxo de projeto mais intuitivo para novos usuários. Considera-se que a adição de novas funcionalidades ao código é relevante para melhoria dos resultados e experiência de uso em trabalhos futuros. Porém, para os fins dessa pesquisa, considera-se que as funções existentes são suficientes.

Por fim, o trabalho contribui com o levantamento de indagações e reflexões que podem direcionar trabalho futuros. Primeiro, observa-se que verificar e controlar a qualidade das habitações geradas por algoritmos que não se baseiam em tipologias e dimensões pré-determinadas, a partir de regras e restrições, ainda é um grande desafio. E neste caso, ainda depende da avaliação subjetiva e objetiva humana, por parte do projetista que opera o algoritmo.

Assim, enquanto questões subjetivas não podem ser avaliadas por um computador, sugere-se que um sistema de avaliação objetivo possa controlar os resultados gerados após a definição dos usos dos espaços gerados. Logo, sugere-se que para trabalhos futuros, seja desenvolvido e implementado um subsistema de avaliação das soluções projetuais considerando fatores como: habitabilidade, funcionalidade, segurança, econômica e etc. Rotinas para a avaliação desses itens

podem ser desenvolvidas com base na norma de desempenho NBR 15.575. Considera-se também o desenvolvimento e sistematização dos processos para subsistemas de projetos complementares, como estruturais, instalações elétricas e hidrossanitários que possam se conectar com o sistema criado a partir do modelo central. Também, recomenda-se o aperfeiçoamento das soluções do sistema desenvolvido a partir da implementação de regras e restrições mais elaboradas associados à identificação dos espaços gerados, como por exemplo, geração automática de leiaute, adaptação automática de dimensões e configuração de mobiliários sob medida, como por exemplo bancadas de cozinha, marcenarias e etc.

A segunda questão levantada indaga como potencial da CM pode ir além das melhorias na configuração individual da forma e dos espaços interiores, para contribuir com a melhoria dos espaços exteriores coletivos dos conjuntos habitacionais, e ainda, na influência do conjunto habitacional em seu entorno urbano. Logo, recomenda-se que trabalhos futuros tenham como foco o desenvolvimento de algoritmos cujos resultados customizados estabeleçam influência nessas três esferas do projeto. Também, enquanto a associação de um processo a um determinado contexto e a uma determinada ferramenta específica pode torna-lo facilmente datado, recomenda-se a aplicação dos processos descritos no presente trabalho a outros contextos espaciais e o seu desenvolvimento em outras plataformas, assim como o uso de linguagens de projetuais mais robustas.

Finalmente, recomenda-se que trabalhos futuros tenham como foco o desenvolvimento e sistematização dos processos dos subsistemas de produção, elicitação e logística, conforme categorizados nesta pesquisa.

REFERÊNCIAS

- AL-WERIKT, G. Supply Chain Management In Construction; Revealed. **INTERNATIONAL JOURNAL OF SCIENTIFIC & TECHNOLOGY RESEARCH**, v. 6, n. 3, p. 106-110, março 2017. ISSN 2277-8616.
- ANDRADE, M. L. V. X. D.; RUSCHEL, R. C. Building Information Modeling (BIM). In: KOWALTOWSKI, D. C. C. K., et al. **O processo de projeto em arquitetura: da teoria à tecnologia**. 1ª. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2011. Cap. 21, p. 421-442.
- APA - THE ENGINEERED WOOD ASSOCIATION. **Oriented Strand Board Product Guide**. APA - The Engineered Wood Association. Tacoma, p. 12. 2017.
- AVALONE, M. C.; CALEGARI, L. P.; FETTERMANN, D. D. C. **Customização em massa de edifícios residenciais: uma revisão de literatura**. Anais do XXVI Simpósio de Engenharia de produção. Bauru: [s.n.]. 2019. p. 1-13.
- AVALONE, M. C.; FETTERMANN, D. D. C. **Customização em massa de edifícios residenciais: uma revisão de literatura**. Desafios da Engenharia de Produção no Contexto da Indústria 4.0. Bauru, SP, Brasil: XXVI Simpósio de Engenharia de Produção. 2019. p. 1-13.
- AVALONE, M. C.; FETTERMANN, D. D. C. Demandas de customização em edifícios residenciais no Brasil: uma análise de agrupamentos empírico-qualitativa com base no sistema Skeleton/Infill. **Ambiente construído**, Porto Alegre, v. 20, n. 2, p. 489-503, abril-junho 2020. ISSN 1678-8621.
- BARLOW, J. et al. "Choice and delivery in housebuilding: lessons from Japan for UK housebuilders. **Building Research & Information**, v. 31, n. 2, p. 134-145, 2003. ISSN 1466-4321.
- BARMAN, S.; CANIZARES, A. E. A Survey of Mass Customization in Practice. **International Journal of Supply Chain Management**, v. 4, n. 1, p. 65-72, março 2015.
- BENROS, D. et al. Automated Design and Delivery of Relief Housing : The Case of post-Earthquake Haiti. **Designing Together - CAADFutures 2011 - Proceedings of the 14th International conference on Computer Aided Architectural Design**, Liège, p. 247-264, 2011. ISSN 978-2-8745-6142-9.

BENROS, D.; DUARTE, J. P. An integrated system for providing mass customized housing. **Automation in Construction**, Lisboa, v. 18, p. 310-320, Maio 2009. ISSN 0926-5805.

BIANCONI, F.; FILIPPUCCI, M.; BUFFI, A. Automated design and modeling for mass-customized housing. A web-based design space catalog for timber structures. **Automation in Construction**, n. 103, p. 13-25, 12 março 2019. ISSN 0926-5805.

BLECKER, T.; ABDELKAFI, N. Mass customization: state-of-the-art and challenges. In: BLECKER, T.; FRIEDRICH, G. **Mass Customization: Challenges and Solutions**. Nova York: Springer Science+Business Media, Inc., 2006. p. 1-25.

BONDUKI, N. G. Origens da habitação social no Brasil. **Análise Social**, v. XXIX, n. 127, p. 711-732, 1994.

BOOTHROYD, G.; DEWHURST, P.; KNIGHT, W. **Product Design for**. 3^a. ed. Boca Raton: CRC Press, 2010.

BRANDÃO, D. Q. Disposições técnicas e diretrizes para projeto de habitações sociais evolutivas. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 11, n. 2, p. 73-96, junho 2011. ISSN 1678-8621.

BRANDÃO, F.; PAIO, A.; WHITELAW, C. **Mapping Mass Customization**. ShoCK – Sharing of Computable Knowledge - Proceedings of the 35th International Conference on Education and Research in Computer Aided Architectural Design in Europe. Roma: eCAADe and Dep. of Civil, Building and Environmental Engineering, Faculty of Civil and Industrial. 2017. p. 417-423.

CAETANO, I.; SANTOS, L.; LEITÃO, A. Computational design in architecture: Defining parametric, generative, and algorithmic design. **Frontiers of Architectural Research**, v. 12, n. 8, p. 2-14, 2019.

CAIXA ECONÔMICA FEDERAL. Referências de preços e custos. **Site da Caixa Econômica Federal**, 2021. Disponível em: <<https://www.caixa.gov.br/poder-publico/modernizacao-gestao/sinapi/referencias-precos-insumos/Paginas/default.aspx>>. Acesso em: junho 2021.

CONSTANTINO, F.; GRAVIO, G. D.; TRONCI, M. A Logistics Reference Model for Mass Customization. In: GROZNIK, A.; XIONG, Y. **Pathways to Supply Chain Excellence**. 1^a. ed. Rijeka: InTech, 2012. Cap. 10, p. 175-194.

COSTA, E. C. E.; DUARTE, J. P.; BÁRTOLO, P. A Review of Additive Manufacturing for Ceramic Production. **Rapid Prototyping Journal**, v. 23, n. 5, p. 954-963, agosto 2017.

DAVIDSON, S.; IRAN-NEJAD, E. Rhino.Inside®.Revit. **Site do programa Rhinoceros 3D**, 2019. Disponível em: <<https://www.rhino3d.com/inside/revit/beta/>>. Acesso em: novembro 2020.

DAVIS, S. M. **Future Perfect**. 1ª. ed. Boston: Addison Wesley, 1987.

DUARTE, J. P. **Customizing Mass Housing: A Discursive Grammar for Siza's Malagueira Houses**. Massachusetts Institute of Technology. Cambridge, p. 536. 2001.

DUARTE, J. P. **Customizing Mass Housing: A Discursive Grammar for Siza's Malagueira Houses**. Massachusetts Institute of Technology. Cambridge, p. 536. 2001.

DUARTE, J. P. Customizing mass housing: Toward a formalized approach. In: KOLAREVIC, B.; DUARTE, J. P. **Mass customization and design democratization**. Abingdon: Routledge, 2019. Cap. 11, p. 130-142.

FETTERMANN, D. C.; TORTORELLA, G. L.; TABOADA, M. Mass Customization Process in Companies from the Housing Sector in Brazil. In: ROBLES, G. C.; ALCARAZ, J. L. G.; HERNÁNDEZ, G. A. **Managing Innovation in Highly Restrictive Environments**. 1ª. ed. Heidelberg: Springer International Publishing, 2019. Cap. 5, p. 99-118.

FRANKE, N.; PILLER, F. T. Key research issues in user interaction with user toolkits in a mass customisation system. **International Journal of Technology Management**, v. 26, n. 5-6, p. 578-599, 2003.

GAZEL, J. L. D. T. E. et al. 2 BITS: A case of mass customization for social housing, São Carlos, v. 5, n. 1, p. 1-6, 7 agosto 2018. ISSN 2318-6968.

GILMORE, J. H.; B. JOSEPH, P. I. The four faces of mass customization. **Harvard Business Review**, v. 75, n. 1, p. 91-101, 1997.

HART, C. W. L. Mass customization: conceptual underpinnings, opportunities and limits. **International Journal of Service Industry Management**, West Yorkshire, v. 6,

n. 2, p. 36-45, 1995.

JIERU, Z. Life Cycle Management of Prefabricated Housing. **Applied Mechanics and Materials**, v. 209-211, p. 1476-1479, outubro 2012.

KAPLAN, A. M.; HAENLEIN, M. Toward a Parsimonious Definition of Traditional and Electronic. **The journal of product innovation management**, 2006. 168-181.

KHALILI-ARAGHI, S.; KOLAREVIC, B. Development of a framework for dimensional customization system: A novel method for customer participation. **Journal of Building Engineering**, n. 5, p. 231-238, Janeiro 2016a. ISSN 2352-7102.

KHALILI-ARAGHI, S.; KOLAREVIC, B. Captivity or Flexibility: Complexities in a Dimensional Customization System. eCAADe 2016 : proceedings of the 34rd International Conference on Education and Research in Computer Aided Architectural Design in Europe, Oulu, v. II, p. 633-642, agosto 2016b.

KHALILI-ARAGHI, S.; KOLAREVIC, B. Variability and validity: Flexibility of a dimensional customization system. **Automation in Construction**, n. 109, p. 1-19, novembro 2019. ISSN 0926-5805.

KOLAREVIC, B. Metadesigning customizable houses. In: KOLAREVIC, B.; DUARTE, J. P. **Mass customizations and design democratization**. 1ª. ed. Abingdon: Routledge, 2019. Cap. 10, p. 117-128.

KOLAREVIC, B.; DUARTE, J. P. From massive to mass customization and design democratization. In: KOLAREVIC, B.; DUARTE, J. P. **Mass customization and design democratization**. Abington : Routledge, 2019. Cap. 1, p. 1-12.

LARSEN, M. S. S. et al. Mass Customization in the House Building Industry: Literature Review and Research Directions. **Frontiers in Built Environment**, 5, outubro 2019. 1-12.

LEE, S.; HÁ, M. Customer interactive building information modeling for apartment unit design. **Automation in Construction**, n. 35, p. 424-430, junho 2013. ISSN 0926-5805.

LEE, X. S. et al. Client-oriented Building Mass Customization (CoBMC). IOP Conference Series: Materials Science and Engineering - International Conference on Architecture and Civil Engineering (ICACE 2017), Kuala Lumpur, v. 291, p. 1-8, maio

2017. ISSN doi:10.1088/1757-899X/291/1/012011.

LOGSDON, L.; FABRICIO, M. M. Instrumentos associados de apoio ao processo de projeto de moradias sociais. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 20, n. 2, p. 401 - 423, abril / junho 2020. ISSN 1678-8621.

MACEDO, M. D. R.; BIJOS, P. R. S.; SANTOS, R. D. C. L. F. D. **Programa Minha Casa, Minha Vida: subsídios para a vaaliação dos planos e orçamentos da plítica pública**. Consultoria de Orçamentos, Fiscalização e Controle - SF; Consultoria de Orçamento e Fiscalização Financeira - CD. Brasília, p. 29. 2017.

MATTOS, A. D. **Como preparar orçamentos de obras**: Dicas para orçamentistas, estudos de caso, exemplos. São Paulo: Editora Pini, 2006.

MENEZES, H. E. A.; MEDEIROS, R. M. D.; SANTOS, J. L. G. Climatologia da pluviometria do município de Teresina, Piauí, Brasil. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, Pombal, v. 11, n. 4, p. 135-141, outubro-dezembro 2016. ISSN ISSN 1981-8203.

MICHAELIS. Dicionário Online Brasileiro Michaelis da Língua Portuguesa, 2021. Disponível em: <<https://michaelis.uol.com.br/moderno-portugues/busca/portugues-brasileiro/algorithm/>>. Acesso em: Julho 2021.

MITCHELL, W. J. **A Lógica da Arquitetura**: projeto, computação e cognição. Tradução de Maria Gabriela Celani. Campinas: Editora da Unicamp, 2008.

MOHAMED, B. E.; GEMME, F.; SPRECHER, A. Information and Construction: Advanced Applications of Digital Prototyping in the Housing Industry. **eCAADe 2016 : proceedings of the 34rd International Conference on Education and Research in Computer Aided Architectural Design in Europe**, Oulu, v. II, p. 591 - 600, agosto 2016.

MONTANER, J. M. **Do diagrama às experiências, rumo a uma arquitetura de ação**. Tradução de Maria Luisa de Abreu Lima Paz. 1ª. ed. São Paulo: Gustavo Gili, 2017.

MOSTAFA, S. et al. Exploring the status, benefits, barriers and opportunities of using BIM for advancing prefabrication practice. **International Journal of Construction Management**, p. 1-11, setembro 2018. ISSN 2331-2327.

NESBITT, K. **Uma nova agenda para a arquitetura**: antologia teórica 1965 - 1995.

São Paulo: Cosac Naify, 2006.

NIELSEN, K. et al. **Utilization of Mass Customization in Construction and Building Industry**. Managing Complexity: Proceedings of the 8th World Conference on Mass Customization, Personalization, and Co-Creation (MCPC 2015). Montreal: Springer. 2016. p. 115 - 125.

NOGUCHI, M. et al. Mass Customisation. In: NOGUCHI, M. **ZEMCH: Toward the Delivery of Zero Energy Mass Custom Homes**. 1ª. ed. New York: Springer, 2016. p. 95-119.

OLIVEIRA, L. C. D.; LOPES, W. G. R. Vivenciando o lugar: Estudos das relações do homem-ambiente e suas implicações no bairro Olarias, Teresina, Piauí. **Ambiente & Sociedade**, São Paulo, v. 23, p. 1-22, 2020. ISSN 1809-4422. Acesso em: Julho 2020.

OXMAN, R. Theory and design in the first digital age. **Design Studies**, v. 27, n. 3, p. 229-265, janeiro 2006.

PAOLINI, A.; KOLLMANNSBERGER, S.; RANK, E. Additive manufacturing in construction: A review on processes, applications, and digital planning methods. **Additive Manufacturing**, v. 30, p. 1-13, 2019.

PAPADOPOULOS, G. A. et al. Supply Chain Improvement in Construction Industry. **Universal Journal of Management**, v. 4, n. 10, p. 528-534, 2016.

PILLER, F. T. Creating a sustainable mass customization business model. In: KOLAREVIC, B.; DUARTE, J. P. **Mass customization and design democratization**. Abington: Routledge, 2019. Cap. 3, p. 30 - 40.

PINE II, B. J. **Mass Customization: the new frontier in business competition**. Boston: harvard Buisness Cchool Press, 1993.

PINE II, B. J. Customering: the next stage in the shift to mass customization. In: KOLAREVIC, B.; DUARTE, J. P. **Mass customization and design democratization**. Abington: Routledge, 2019. Cap. 2, p. 13-28.

PINE II, B. J.; VICTOR, B.; BOYNTON, A. Makin Mass Customization Work. **Harvard Business Review**, Boston, p. 107-116, Setembro 1993. ISSN 93509.

PINE II, J. **Paradigm shift--from mass production to mass customization**. Massachusetts Institute of Technology. Chicago, p. 258. 1991.

PIROOZFAR, A. E.; LARSEN, O. P. Customizing Building Envelopes: Retrospects and Prospects of Customization in the Building Industry. In: PILLER, F. T.; TSENG, M. **Handbook of Research in Mass Customization and Personalization**. [S.l.]: World Scientific Publishing Company, v. 1, 2009. Cap. 3, p. 869-891.

PREFEITURA MUNICIPAL DE TERESINA. **PLANO DE REASSENTAMENTO INVOLUNTÁRIO - PRI RUA MANOEL DE AGUIAR FILHO – TRECHO 2**. Prefeitura Municipal de Teresina. Teresina, p. 80. 2019a.

PREFEITURA MUNICIPAL DE TERESINA. Residencial Parque Brasil será entregue em fevereiro para comunidade. **Site da Prefeitura Municipal de Teresina**, 2019b. Disponível em: <<https://pmt.pi.gov.br/2019/11/23/residencial-parque-brasil-sera-entregue-em-fevereiro-para-comunidade/>>. Acesso em: Agosto 2020.

PREFEITURA MUNICIPAL DE TERESINA. Teresina. **Site da Prefeitura Municipal de Teresina**, 2020. Disponível em: <<https://pmt.pi.gov.br/teresina/>>. Acesso em: Agosto 2020.

PUPO, R.; CELANI, M. G.; DUARTE, J. P. **Digital materialization for architecture: definitions and techniques**. Proceedings of the 13th Congress of the Iberoamerican Society of Digital Graphics. São Paulo: SIGraDi 2009. 2009. p. 439-442.

PUUSEPP, R.; LOOKE, T.; KIVI, K. Enabling Customer Choice in Housing. Protocols, Flows and Glitches - The 22nd Conference on Computer-Aided Architectural Design Research in Asia (CAADRIA) 2017, Hong Kong, p. 251-261, 2017.

RUBIN, G. R.; BOLFE, S. A. O desenvolvimento da habitação social no Brasil. **Ciência e Natura**, Santa Maria, v. 36, n. 2, p. 201-213, maio-agosto 2014. ISSN 0100-8307.

SALVADOR, F.; HOLAN, P. M. D.; PILLER, F. Cracking the code of mass customization. **MIT Sloan Management Review**, Cambridge, 2009. 70-79.

SISTEMA NACIONAL DE PESQUISA DE CUSTOS E ÍNDICES DA CONSTRUÇÃO CIVIL. PCI.818.01 - CUSTOS DE COMPOSIÇÕES ANALÍTICO ENCARGOS SOCIAIS DESONERADOS: 83,37%(HORA) 47,61%(MÊS). ABRANGENCIA: NACIONAL. SINAPI. [S.l.], p. 3624. 2021.

SMITH, R. E. **Prefab Architecture: a guide to modular design and construction**. 1ª. ed. Nova Jersey: John Wiley & Sons, 2010.

SMITH, R. E. Mass Prefabrication: Investigating the Relationship Between Prefabrication and Mass Customization in Architecture. In: KOLAREVIC, B.; DUARTE, J. P. **Mass customization and Design Democratization**. 1ª. ed. Nova York: Routledge, 2019. Cap. 14, p. 175 -184.

SQUIRE, B. et al. Mass customization: the key to customer value? **Production Planning & control**, Abingdon, 2004. 459 -471.

TAUBE, J.; HIROTA, E. H. 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, outubro-dezembro 2017. ISSN 1678-8621.

TIIHONEN, J.; FELFERNING, A. An introduction to personalization and mass customization. **Journal of Intelligent Information Systems**, v. 49, p. 1-7, 2017. ISSN 1573-7675.

VELIZ, A.; MEDJDOUB, B.; KOCATURK, T. Bridging the Gap in Constraint-Based Design. **Designing Together - CAADFutures 2011 - Proceedings of the 14th International conference on Computer Aided Architectural Design**, Liège, p. 133-147, 2011. ISSN 978-2-8745-6142-9.

VELOSO, P.; CELANI, G.; SCHEEREN, R. From the generation of layouts to the production of construction documents: An application in the customization of apartment plans. **Automation in Construction**, n. 96, p. 224-235, Outubro 2018. ISSN 0926-5805.

YAZDI, A. J.; FINI, A. A. F.; FORSYTHE, P. An Integrated Product Planning and Design Platform in the Context of Housebuilding Industry. **Construction Research Congress 2020: Computer Applications**, Arizona, p. 802-811, agosto 2020. ISSN 9780784482865.

ZHAO, H. et al. “Why do we not buy mass customised products?” – An investigation of consumer purchase intention of mass customised products, v. 10, n. 2, p. 181-190, 2019. ISSN 2217-2661.

ZIPKIN, P. The Limits of Mass Customization. **MIT Sloan Management Review**, Cambridge, 2001. 80-87.

APÊNDICE A – TRABALHOS ANALISADOS

| Titulo | Autor | Ano | Local da publicação | Fases da CM (Duart e Pillier) | Uso do BIM (Andrade e Ruschei) | Categoria |
|--|---|------|-------------------------------------|--|---------------------------------|---|
| Automated design and modeling for mass-customized housing. A web-based design space catalog for timber structures | Fabio BIANCONI; Marco FILIPPUCCI; Alessandro BUFFI | 2019 | Automation in Construction | Sistema computacional | Metodologia | Automatização do processo de projeto |
| 2 BITS: A case of mass customization for social housing | Jorge Lira de Toledo e GAZEL; Andressa Carmo Pena MATINEZ; Denise Mónico dos SANTOS; Douglas Lopes de SOUZA | 2018 | SiGraDI 2018 | Sistema de projeto; sistema computacional; sistema de produção | Tecnologia | Automatização do processo de projeto |
| From the generation of layouts to the production of construction documents: An application in the customization of apartment plans | Pedro VELOSO; Gabriela CELANI; Rodrigo SCHEEREN | 2018 | Automation in Construction | Sistema de projeto; sistema computacional | Tecnologia | Automatização do processo de projeto |
| Information and Construction: Advanced Applications of Digital Prototyping in the Housing Industry | Bassem Eid MOHAMED; Frederic GEMME; Aaron SPRECHER | 2016 | eCAADe 34 | Sistema de projeto; sistema computacional | Metodologia | Automatização do processo de projeto |
| Captivity or Flexibility: Complexities in a Dimensional Customization System | Saiman KHALILI-ARAGHI; BRANKO KOLAREVIC | 2016 | eCAADe 34 | Sistema de projeto | Metodologia | Automatização do processo de projeto |
| Automated Design and Delivery of Relief Housing: The Case of post-Earthquake Haiti | Deborah BENROS; Vasco GRANADEIRO; Jose DUARTE; Terry KNIGHT | 2011 | CAADFuture 2011 | Sistema computacional | Tecnologia | Automatização do processo de projeto |
| Bridging the Gap in Constraint-Based Design | Alejandro VELZ; Benachir MEDJDOUB; Tuba KOCAATURK | 2011 | CAADFuture 2011 | Sistema de projeto | Ferramenta | Automatização do processo de projeto; interface com o usuário |
| An Integrated Product Planning and Design Platform in the Context of Housebuilding Industry | Alireza Jalali YAZDI; Alireza Ahmadian Fard FINI; Perry FORSYTHE | 2020 | Construction Research Congress 2020 | Sistema de projeto; sistema computacional | Metodologia | Automatização do processo de projeto; interface com o usuário |
| Variability and validity: Flexibility of a dimensional customization system | Saiman KHALILI-ARAGHI; BRANKO KOLAREVIC | 2019 | Automation in Construction | Sistema de projeto | Metodologia | Automatização do processo de projeto; interface com o usuário |
| Development of a framework for dimensional customization system: A novel method for customer participation | Saiman KHALILI-ARAGHI; BRANKO KOLAREVIC | 2016 | Journal of Building Engineering | Sistema de projeto | Metodologia | Automatização do processo de projeto; interface com o usuário |
| Life Cycle Management of Prefabricated Housing | Zhang JIERU | 2012 | Applied Mechanics and Materials | Sistema de projeto; sistema computacional | Metodologia | Gerenciamento de projeto |

| | | | | | | |
|---|---|------|--|--------------------|------------|--|
| Enabling Customer Choice in Housing | Renee PUUSEPP; Taavi LOOKE; Kaiko KIVI | 2017 | CAADRIA 2017 | Sistema de projeto | Tecnologia | Interface com o usuário |
| Customer interactive building information modeling for apartment unit design | Soyeon LEE; Mikyoung HÁ | 2013 | Automation in Construction | Sistema de projeto | Tecnologia | Interface com o usuário |
| Exploring the status, benefits, barriers and opportunities of using BIM for advancing prefabrication practice | Sherif MOSTAFA; Ki Pyung KIM; Vivian W. Y. TAM; Payam RAHNAMAYEZEKAVAT | 2018 | International Journal of Construction Management | | | Potenciais do uso do BIM na CM de habitações |
| Client-oriented Building Mass Customization (CoBMC) | Xia Sheng LEE; Mohd Faris KHAMIDI; Sivaraman KUPPUSAMY; Chih Tuck HENG | 2017 | ICACE 2017 | | | Potenciais do uso do BIM na CM de habitações |

APÊNDICE B – PARÂMETROS DE PROJETO

| PARÂMETROS DE PROJETO | |
|--|----------------------|
| Parâmetro: opções | Cardinalidade |
| Configuração do terreno | |
| Acesso ao terreno: lado 1; lado 2; lado 3; lado 4 | 4 |
| Largura do terreno: de 5m à 60m | 55 |
| Comprimento do terreno: de 5m à 60m | 55 |
| Configuração do núcleo das áreas molhadas | |
| Módulo do banheiro: mod A; mod B; mod C; mod D; mod E; mod F; mod H | 8 |
| Vértice do módulo: 0; 1; 2; 3 | 4 |
| Direção do eixo hidráulico: x; y | 4 |
| Mover banheiro para a circulação externa: sim; não | 2 |
| Módulos do núcleo hidráulico: módulo do banheiro; módulo do banheiro + adjacente | 2 |
| Adicionar área de serviço: sim; não | 2 |
| Posição da área de serviço: adjacente ao banheiro; oposta ao banheiro | 2 |
| Dimensão x do banheiro: de 100 a 300(cm) | 200 |

| | |
|--|-----|
| Dimensão y do banheiro: de 100 a 300(cm) | 200 |
| Dimensão da área de serviço: de 100 a 300(cm) | 200 |
| Configuração das circulações | |
| Circulação mínima: 59 a 150 (cm) | 91 |
| Largura da circulação no eixo x1: 0 a 450 (cm) | 451 |
| Largura da circulação no eixo x2: 0 a 450 (cm) | 451 |
| Largura da circulação no eixo x3: 0 a 450 (cm) | 451 |
| Largura da circulação no eixo y: 0 a 450 (cm) | 451 |
| Inserção e exclusão de módulos | |
| Módulo A: incluir; excluir | 2 |
| Módulo B: incluir; excluir | 2 |
| Módulo C: incluir; excluir | 2 |
| Módulo D: incluir; excluir | 2 |
| Módulo E: incluir; excluir | 2 |
| Módulo F: incluir; excluir | 2 |
| Módulo G: incluir; excluir | 2 |

| | |
|---|---|
| Módulo H: incluir; excluir | 2 |
| Definição da função dos módulos | |
| Função módulo A: Escrever livremente a função atribuída ao espaço gerado pelo módulo A. | - |
| Função módulo B: Escrever livremente a função atribuída ao espaço gerado pelo módulo B. | - |
| Função módulo C: Escrever livremente a função atribuída ao espaço gerado pelo módulo C. | - |
| Função módulo D: Escrever livremente a função atribuída ao espaço gerado pelo módulo D. | - |
| Função módulo E: Escrever livremente a função atribuída ao espaço gerado pelo módulo E. | - |
| Função módulo F: Escrever livremente a função atribuída ao espaço gerado pelo módulo F. | - |
| Função módulo G: Escrever livremente a função atribuída ao espaço gerado pelo módulo G. | - |
| Função módulo H: Escrever livremente a função atribuída ao espaço gerado pelo módulo H. | - |
| Configuração da integração entre módulos | |
| Integração AC: opção 0; opção 1; opção 2; opção 3 | 4 |
| Integração BD: opção 0; opção 1; opção 2; opção 3 | 4 |
| Integração CE: opção 0; opção 1; opção 2; opção 3 | 4 |
| Integração DF: opção 0; opção 1; opção 2; opção 3 | 4 |
| Integração EG: opção 0; opção 1; opção 2; opção 3 | 4 |

| | |
|---|-----|
| Integração FH: opção 0; opção 1; opção 2; opção 3 | 4 |
| Integração AB: opção 0; opção 1; opção 2; opção 3 | 4 |
| Integração CD: opção 0; opção 1; opção 2; opção 3 | 4 |
| Integração EF: opção 0; opção 1; opção 2; opção 3 | 4 |
| Integração GH: opção 0; opção 1; opção 2; opção 3 | 4 |
| Definição das dimensões do projeto | |
| Altura do pé-direito: 220 a 400 | 180 |
| Altura das paredes baixas: 50 a 220 | 170 |
| Altura das platibandas: 50 a 150 | 100 |
| Dimensão ax: 0 a 500 | 501 |
| Dimensão ay: 0 a 500 | 501 |
| Dimensão bx: 0 a 500 | 501 |
| Dimensão by: 0 a 500 | 501 |
| Dimensão cx: 0 a 500 | 501 |
| Dimensão cy: 0 a 500 | 501 |
| Dimensão dx: 0 a 500 | 501 |

| | |
|---|-----|
| Dimensão dy: 0 a 500 | 501 |
| Dimensão ex: 0 a 500 | 501 |
| Dimensão ey: 0 a 500 | 501 |
| Dimensão fx: 0 a 500 | 501 |
| Dimensão fy: 0 a 500 | 501 |
| Dimensão gx: 0 a 500 | 501 |
| Dimensão gy: 0 a 500 | 501 |
| Inclusão da circulação interna | |
| Incluir circulação: sim; não | 2 |
| Módulo da circulação: todos os módulos (A a H) exceto aqueles que abrigam o núcleo hidráulico (podendo ser 1 ou 2). | 6 |
| Eixo da circulação: x; y | 2 |
| Lado: lado 1; lado 2 | 2 |
| Inclusão de área molhada adicional | |
| Incluir área molhada adicional: sim; não | 2 |
| Módulo da a. molhada: todos os módulos (A a H) exceto aqueles que abrigam o núcleo hidráulico (podendo ser 1 ou 2). | 6 |

| | |
|---|-----|
| Canto opção 0; opção 1; opção 2; opção 3 | 4 |
| Mover A. molhada para circulação externa: sim; não | 2 |
| Função da área molhada: Escrever livremente a função atribuída à área molhada adicional | |
| Dimensão x: de 100 a 300 (cm) | 200 |
| Dimensão y: de 100 a 300 (cm) | 200 |
| Direção do eixo hidráulico: eixo y; eixo x | 2 |
| Inclusão de caixa d'água adicional | |
| Incluir caixa d'água adicional: sim; não | 2 |
| Módulo da caixa d'água adicional: Pode ser escolhida uma opção entre todos os módulos (A a H) exceto aquele que já abriga uma caixa d'água | 7 |
| Inclusão e exclusão da estrutura | |
| Mods AB: incluir; excluir | 2 |
| Mods CD: incluir; excluir | 2 |
| Mods EF: incluir; excluir | 2 |
| Mods GH: incluir; excluir | 2 |
| Configuração da cobertura | |

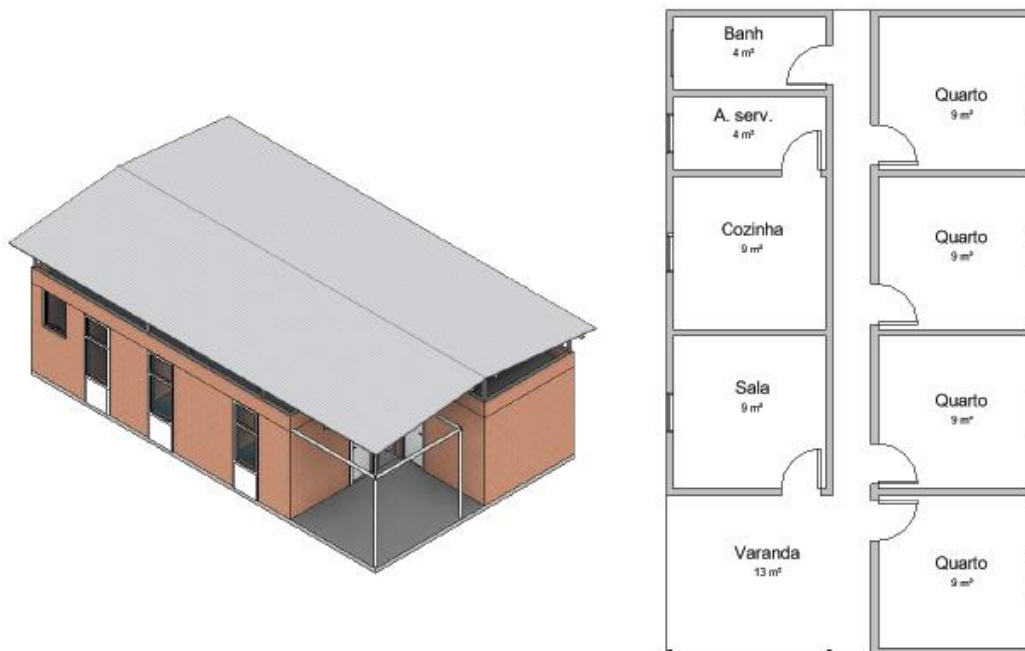
| | |
|---|-----|
| Tipo de cobertura: opção 0; opção 1; opção 2 | 3 |
| Dimensão do beiral: de 0 a 120 (cm) | 121 |
| Caimento: de 0 a 15 graus | 16 |
| Altura da cobertura: de 50 a 220 (cm) | 170 |
| Distância dos caibros: de 50 a 600 (cm) | 550 |
| Distância dos montantes verticais: de 50 a 600 (cm) | 550 |
| Exclusão de eixos | |
| Exclui qualquer eixo listado no projeto que for selecionado. Não há como prever, pois, este parâmetro se altera conforme a manipulação dos parâmetros anteriores. | - |
| Seleção das alvenarias hidráulicas | |
| Seleciona as alvenarias hidráulicas do projeto entre as opções oferecidas com base em uma série de regras projetuais oriundas do código. Não há como prever, pois, as opções deste parâmetro se alteram conforme a manipulação dos parâmetros anteriores. | - |
| Seleção das alvenarias baixas | |
| Seleciona as alvenarias baixas do projeto entre as opções oferecidas com base em uma série de regras projetuais oriundas do código. Não há como prever, pois, as opções deste parâmetro se alteram | - |

| | |
|---|---|
| conforme a manipulação dos parâmetros anteriores. | |
| Seleção das alvenarias de cobogó | |
| Seleciona as alvenarias de cobogó do projeto entre as opções oferecidas com base em uma série de regras projetuais oriundas do código. Não há como prever, pois, as opções deste parâmetro se alteram conforme a manipulação dos parâmetros anteriores. | - |
| Inclusão de portas | |
| Extremidade 01 dos eixos disponíveis | |
| Inclui uma porta na extremidade 01 dos eixos selecionados. Não há como prever, pois, as opções deste parâmetro se alteram conforme a manipulação dos parâmetros anteriores. | - |
| Extremidade 02 dos eixos disponíveis | |
| Inclui uma porta na extremidade 02 dos eixos selecionados. Não há como prever, pois, as opções deste parâmetro se alteram conforme a manipulação dos parâmetros anteriores. | - |
| Centro dos eixos disponíveis | |
| Inclui uma porta no centro dos eixos selecionados. Não há como prever, pois, as opções deste parâmetro se alteram conforme a manipulação dos parâmetros anteriores. | - |
| Inclusão de janelas | |

| | |
|---------------------------|---|
| Idem a inclusão de portas | - |
|---------------------------|---|

APÊNDICE C - RELATÓRIOS DOS PROJETOS

Pesquisador 01



Perfil 6: mãe solteira com 3 ou mais filhos sem atividade remunerada no domicílio.

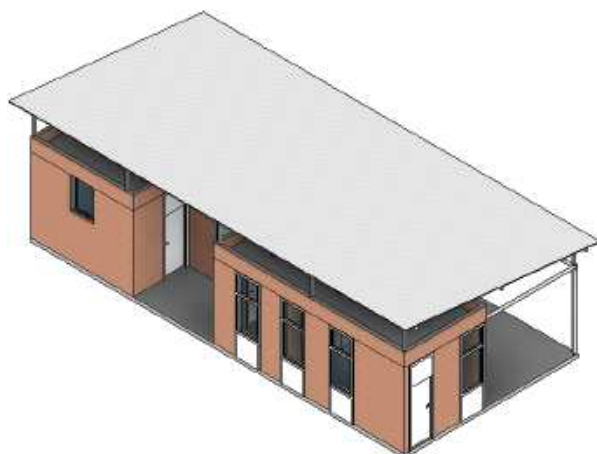
Programa definido: Sala, cozinha, área de serviço, banheiro, 4 quartos e varanda.

Informações: Área construída: 67,20m² | custo final (SINAPI): R\$110.304,80

Pontos de destaque do projeto: Único projeto a buscar o uso da circulação longitudinal externa. O participante relatou que teve muita dificuldade em desenvolver uma solução devido a incompatibilidades de um programa extenso com um terreno muito estreito.

Problemas encontrados: o participante relatou erro nos parâmetros de configuração dos componentes construtivos cujas opções de valores não apareciam. Foi necessário reiniciar a plataforma para que o participante pudesse continuar a atividade. Durante a comunicação com o Revit, uma das portas não foi enviada.

Pesquisador 02



Perfil 4: mãe solteira com 2 filhos realizando atividade remunerada na residência como costureira.

Programa definido: Sala, Sala de jantar, atelier, banheiro, suíte, quarto, cozinha, área de serviço, varanda e garagem.

Informações: Área construída: 69,13m² | custo final (SINAPI): R\$97.880,22

Pontos de destaque do projeto: Projeto altamente compactado. A área de serviço desconectada do banheiro não configura o núcleo de áreas molhadas proposto pela linguagem. Área insuficiente no atelier, sala de jantar, suíte, banheiros, cozinha e área de serviço

Problemas encontrados: o participante apresentou dúvidas sobre quais e como alguns dos parâmetros poderiam ser utilizados para que determinados resultados fossem obtidos. Percebe-se que o participante não respeitou a configuração das áreas molhadas, trocando a função de determinados cômodos para que chegasse a um resultado mais adequado a sua vontade. O algoritmo permitiu que cômodos com áreas inadequadas fossem criados.

Pesquisador03



Perfil 1: 2 casais com 1 filho realizando atividade remunerada na residência como costureira.

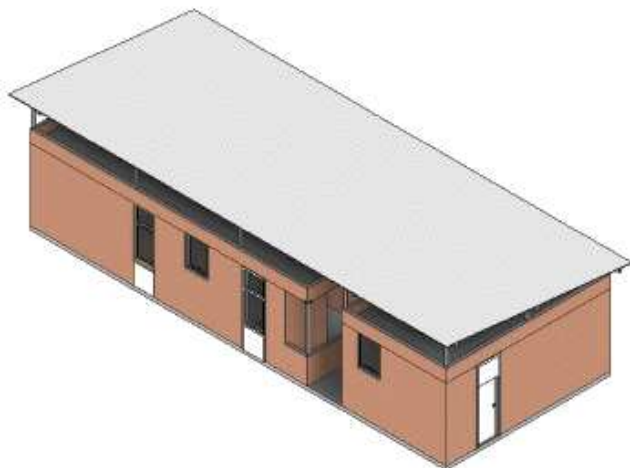
Programa definido: Sala de estar / jantar, banheiro, cozinha, sala de costura, 2 quartos e suíte.

Informações: Área construída: 89,60m² | custo final (SINAPI): R\$97.880,22

Pontos de destaque do projeto: Projeto possui boa distribuição dos ambientes. Uso da integração entre módulos para criar áreas de acesso entre cômodos. Área insuficiente nos banheiros.

Problemas encontrados: o participante relatou problemas para inserir as portas nos eixos 8 e 9. O eixo 8 deveria estar inserido no ambiente E(quarto), entretanto ficou localizado dentro do eixo 9. Quanto a porta inserida para o eixo 9, que deveria estar centralizada entre os eixos 22 e 26, acabou centralizada entre os eixos 22 e 30 devido à erro encontrado na identificação dos eixos após integração entre cômodos.

Pesquisador 04



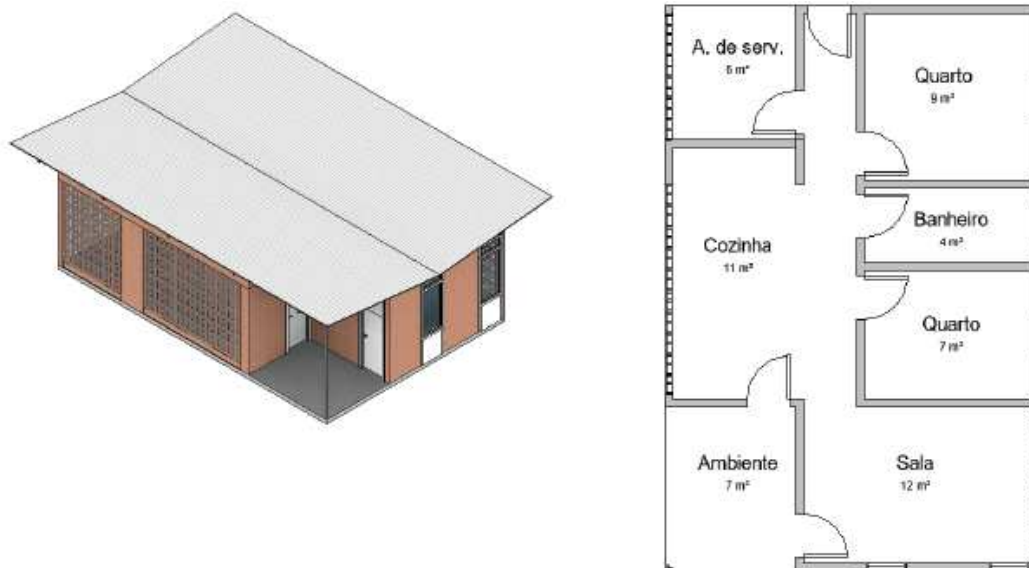
Perfil 1: mãe solteira com filhos e agregados realizando atividade remunerada na residência como mercearia.

Programa definido: Sala, banheiro, cozinha, área de serviço, 4 quartos e suíte. Mercearia com depósito e banheiro.

Informações: Área construída: 95,36m² | custo final (SINAPI): R\$112.419,70

Pontos de destaque do projeto: O participante buscou separar a área destinada a atividade remunerada da residência, aproveitando melhor o terreno a partir do uso da circulação externa horizontal.

Problemas encontrados: o participante apresentou dúvidas sobre quais e como alguns dos parâmetros poderiam ser utilizados para que determinados resultados fossem obtidos. Foram encontrados erros nos parâmetros de escolha das janelas altas que eram resetados quando parâmetros anteriores eram modificados o que dificultou o processo em algumas etapas.

Pesquisador 05

Perfil 2: casal de idosos sem filhos e sem atividade remunerada na residência.

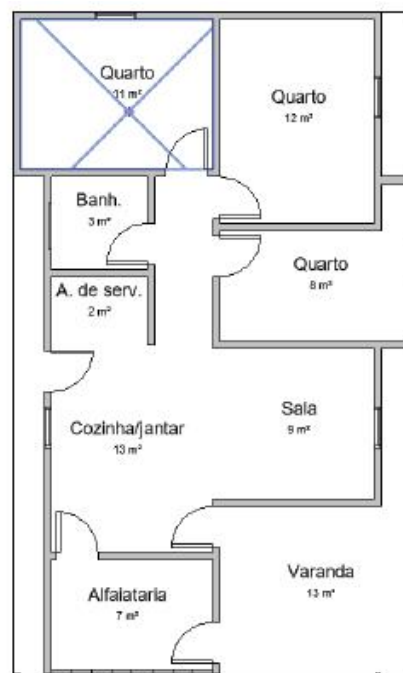
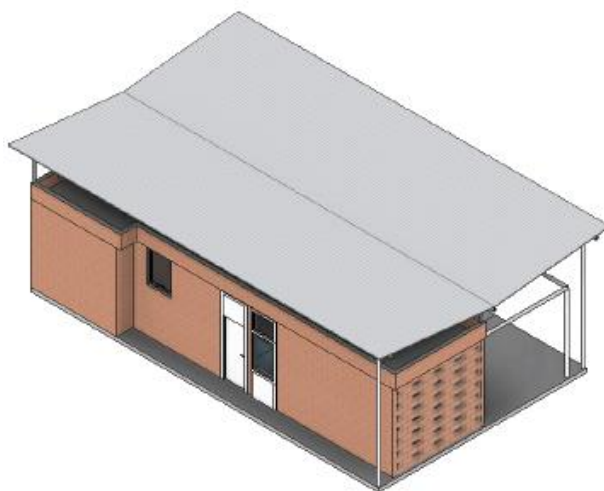
Programa definido: Sala, banheiro, cozinha, área de serviço, 2 quartos e varanda.

Informações: Área construída: 61,14m² | custo final (SINAPI): R\$73.785,36

Pontos de destaque do projeto: Projeto possui boa distribuição de espaços e áreas adequadas. A área de serviço desconectada do banheiro não configura o núcleo de áreas molhadas proposto pela linguagem.

Problemas encontrados: o participante apresentou dúvidas sobre quais e como alguns dos parâmetros poderiam ser utilizados para que determinados resultados fossem obtidos. Percebe-se que o participante não respeitou a configuração das áreas molhadas, trocando a função de determinados cômodos para que chegasse a um resultado mais adequado a sua vontade.

Pesquisador 06



Perfil 3: casal com 2 filhos realizando atividade remunerada na residência como costureira.

Programa definido: Sala, alfaiataria, cozinha/ sala de janta, área de serviço, banheiro, 3 quartos.

Informações: Área construída: 75,52m² | custo final (SINAPI): R\$98.840,08

Pontos de destaque do projeto: Projeto possui boa distribuição de espaços e áreas adequadas. Percebe-se que há excesso de descontinuidade dos segmentos das paredes.

Problemas encontrados: o participante apresentou dúvidas sobre quais e como alguns dos parâmetros poderiam ser utilizados para que determinados resultados fossem obtidos. Foram encontrados erros nos parâmetros de escolha das portas e janelas que eram resetados quando parâmetros anteriores eram modificados o que dificultou o processo em algumas etapas. Segundo o participante, a integração entre os espaços não funcionou conforme o esperado, gerando soluções inadequadas, como por exemplo, um espaço inutilizável em um dos quartos.