



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo

GIOVANNA TOMCZINSKI NOVELLINI BRÍGITTE

**PARÂMETROS DE PROJETO, BIM E
APRENDIZADO DE MÁQUINA NO SUPORTE À
DECISÃO PROJETUAL**

CAMPINAS

2019

GIOVANNA TOMCZINSKI NOVELLINI BRÍGITTE

**PARÂMETROS DE PROJETO, BIM E
APRENDIZADO DE MÁQUINA NO SUPORTE À
DECISÃO PROJETUAL**

Tese de Doutorado apresentada a Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Unicamp, para obtenção do título de Doutora em Arquitetura, Tecnologia e Cidade, na área de Arquitetura, Tecnologia e Cidade.

Orientadora: Profa. Dra. Regina Coeli Ruschel

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA
TESE DEFENDIDA PELA ALUNA GIOVANNA
TOMCZINSKI NOVELLINI BRÍGITTE E ORIENTADA PELA
PROFA. DRA. REGINA COELI RUSCHEL

ASSINATURA DA ORIENTADORA



CAMPINAS

2019

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura
Rose Meire da Silva - CRB 8/5974

B768p Brígitte, Giovanna Tomczinski Novellini, 1984-
Parâmetros de projeto, BIM e aprendizado de máquina no suporte à
decisão projetual / Giovanna Tomczinski Novellini Brígitte. – Campinas, SP :
[s.n.], 2019.

Orientador: Regina Coeli Ruschel.
Tese (doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de
Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo.

1. Aprendizado de máquina. 2. Arquitetura - Projeto auxiliado por
computador. 3. Projeto auxiliado por computador - Metodologia. 4. Modelagem
de informação da construção. 5. Integração semântica (Sistemas de
computação). I. Ruschel, Regina Coeli, 1958-. II. Universidade Estadual de
Campinas. Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em outro idioma: Patterns, BIM and machine learning in the support of design
decision

Palavras-chave em inglês:

Machine Learning

Architecture - Computer aided design

Computer aided design - Methodology

Building information modeling

Semantic integration (Computer systems)

Área de concentração: Arquitetura, Tecnologia e Cidade

Titulação: Doutora em Arquitetura, Tecnologia e Cidade

Banca examinadora:

Regina Coeli Ruschel [Orientador]

Daniel de Carvalho Moreira

Doris Catharine Cornélie Knatz Kowaltowski

Daniel Ribeiro Cardoso

Anja Pratschke

Data de defesa: 28-08-2019

Programa de Pós-Graduação: Arquitetura, Tecnologia e Cidade

Identificação e informações acadêmicas do(a) aluno(a)

- ORCID do autor: <https://orcid.org/0000-0002-2121-4599>

- Currículo Lattes do autor: <http://lattes.cnpq.br/9234329100754353>

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E
URBANISMO**

**PARÂMETROS DE PROJETO, BIM E APRENDIZADO
DE MÁQUINA NO SUPORTE À DECISÃO PROJETUAL**

Giovanna Tomczinski Novellini Brígite

Tese de Doutorado aprovada pela Banca Examinadora, constituída por:

Profa. Dra. Regina Coeli Ruschel
Presidente e Orientadora/Universidade Estadual de Campinas

Prof. Dr. Daniel de Carvalho Moreira
FEC/ Universidade Estadual de Campinas

Profa. Dra. Doris Catharine Cornelia Knatz Kowaltowski
Universidade Estadual de Campinas

Prof. Dr. Daniel Ribeiro Cardoso
Universidade Federal do Ceará

Profa. Dra. Anja Pratschke
Universidade de São Paulo – campus São Carlos

A Ata da defesa com as respectivas assinaturas dos membros encontra-se no SIGA/Sistema de Fluxo de Dissertação/Tese e na Secretaria do Programa da Unidade.

Campinas, 28 de agosto de 2019

Aos meus avós, por serem sempre meu maior exemplo.
Ao meu parceiro para toda a vida, Guilherme e às minhas meninas, Sophia e Liz.
Maiores e melhores realizações que esta Universidade reservou para a minha vida,
por todo amor, carinho e apoio mesmo com tantas privações e ausências.

AGRADECIMENTOS

A Deus, sempre.

Em especial à minha orientadora, amiga e grande incentivadora Prof.^a Dr.^a. Regina Coeli Ruschel, uma das minhas maiores inspirações acadêmicas, profissionais e familiares. Sem à qual não seria possível o desenvolvimento e conclusão desta tese.

À Prof.^a Dr.^a. Gabriela C. Celani e ao Prof. Dr. Daniel Ribeiro Cardoso, pelas observações e questionamentos valiosos realizados no exame de qualificação, que contribuíram para o desenvolvimento da pesquisa.

Aos meus colegas do Programa de Pós-Graduação da Unicamp, Lucas de Santana Gonçalves, João Alberto Motta Gaspar, Rafael Negreiros de Paiva, principalmente, Natália Kokumai Nakamura e Douglas Lopes de Souza, não apenas pelo incentivo e amizade, mas também pela dedicação, apoio e colaboração, para que este trabalho pudesse ser finalizado.

À Arq. Dra. Rosirene Mayer e a toda a sua equipe, Eduardo Rimolo Carneiro e Professor Dr. Benamy Turkienicz, coordenador do Laboratório para Simulação e Modelagem em Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (SIMMLAB-UFRGS), por gentilmente compartilhar os arquivos da programação desenvolvida no *Grasshopper* para sua pesquisa de doutorado.

Aos meus colegas de trabalho Catherine, Alexandre e Milito por me compreenderem e incentivarem a finalizar esta tese. Em especial aos professores Ana Carolina, Camilla e João e aos primeiros alunos do curso de Arquitetura e Urbanismo do Centro Universitário Facens (turmas 2018 e 19), pelo muito que pude aprender e compreender quanto ao propósito maior desta realização.

Também gostaria de fazer um agradecimento especial aos professores que sempre fizeram parte da minha formação desde as disciplinas de graduação, sempre contribuindo e incentivando não apenas minhas pesquisas, mas, toda a jornada acadêmica professores Ana Góes, Daniel, Evandro, Doris, Lucila, Paulo, Nubia, Sílvia, Stella e Vanessa.

Agradeço também ao Prof. Me. Ari Monteiro, pelas longas conversas sobre o mundo da programação. Não poderia deixar de agradecer ao Eduardo, secretário da Pós, que sempre esteve disposto a me ajudar no que era preciso.

À minha família e à minha querida amiga-irmã Sara, àqueles a quem eu devo tudo.

“For believers, God is in the beginning, and for physicists

He is at the end of all considerations...”

Max Planck.

RESUMO

O Design Computacional e a Modelagem da Informação da Construção (BIM) governam as tendências atuais do projeto mediado por computador em arquitetura. Se, por um lado, o design computacional é capaz de proporcionar um conjunto de inúmeras possibilidades durante a síntese do projeto arquitetônico, por outro, BIM pode ter um enorme impacto no reforço da qualidade das decisões tomadas na fase de concepção, uma vez que promete a integração e processamento de informações em toda a indústria da Arquitetura, Engenharia, Construção e Operação (AECO) combinando tecnologias geométricas e informações não geométricas. Neste sentido, o objetivo principal desta pesquisa é viabilizar a operacionalização da aplicação de parâmetros de projeto através do Enriquecimento Semântico em BIM (ESBIM) para auxiliar a tomada de decisão projetual frente as inúmeras derivações geradas por Sistemas Generativos (SGs). Esta proposição é validada no contexto do projeto de conjuntos habitacionais de interesse social (HIS). O método de pesquisa adotado é o da *Design Science Research*. A solução proposta é composta por quatro métodos que geram: modelos, constructos, métodos e instâncias. O primeiro é um método para escolha de parâmetros de projeto aplicáveis à construção de algoritmos visando atribuir semântica projetual em modelos BIM. O segundo é um método para algoritmizar os parâmetros de projeto. O terceiro é um método para associar o modelo à semântica projetual. O quarto método, para dar suporte à tomada de decisão projetual. Foram realizadas simulações para avaliar os artefatos gerados e aplicado o Aprendizado de Máquina (AM) no suporte à decisão projetual. A amostra consiste nos resultados apresentados pelo sistema generativo computacional para derivação de formas paramétricas da planta baixa de HIS desenvolvido pela equipe do Laboratório para Simulação e Modelagem em Arquitetura e Urbanismo (SIMMLAB). As simulações demonstraram, não apenas, a viabilidade de operacionalização dos parâmetros de projeto em semântica projetual em ambiente computacional, como também, a possibilidade de transformá-los em indicadores, com ênfase na relação humano-ambiente, para auxiliar a tomada de decisão dentre as derivações apresentadas por SGs. O resultado colabora para áreas de Processo de Projeto e Arquitetura Digital, na avaliação de projeto pelos esforços concentrados em propor análises integradas que auxiliem a tomada de decisão. Aproxima ainda, dois ramos da arquitetura digital: o design computacional e a modelagem da informação da construção. Estimula também, a integração de alternativas digitais, consolidadas (CAD, SGs) e promissoras (BIM e AM), subsidiando os projetistas na escolha assertiva de soluções projetuais com diversidade e similaridade semântica, através de métodos e algoritmos de tomada de decisão.

Palavras-chave: Parâmetros de Projeto; BIM; Enriquecimento Semântico; Aprendizado de Máquina; Avaliação de Projeto.

ABSTRACT

Computational Design and Building Information Modeling (BIM) rule the current trends of computer-mediated design in architecture. If, on the one hand, the computational design is able to provide a set of countless possibilities during the synthesis of the architectural design, on the other hand, BIM can have a huge impact in the quality enhancement of the taken decisions in the conception phase, since BIM promises to integrate and process information across the architecture, engineering, construction and operation industry by combining geometric technologies and non-geometric information. In this sense, the main objective of this research is to create a solution that enables the operationalization of the application of design parameters through Semantic Enrichment of BIM to assist the design decision making against the numerous derivations generated by Generative Systems (GS). This proposition is validated in the context of the project of social interest housing complexes. The research method adopted is the Design Science Research's one. The proposed solution is composed of four methods that generate: models, constructs, methods and instances. The first is a method for choosing design parameters applicable to the construction of algorithms to assign design semantics in BIM models. The second is a method to algorithmize design patterns. The third is a method for associating the model with design semantics. The fourth method to support the design decision-making. Simulations were performed to evaluate the generated artifacts and Machine Learning in the support of design decision. The sample consists of the results presented by the computational generative system for derivation of parametric forms of the low floor of Housing of Social Interest, developed by the Laboratory team for Simulation and Modeling in Architecture and Urbanism (SIMMLAB). The simulations demonstrated not only the feasibility of operationalizing design parameters in projectual semantics in a computational environment, but also the possibility of turning them into indicators, with emphasis on the human-environment relationship, to aid decision making among derivations presented by GSs. The result contributes to the Project Process and Digital Architecture matters, in the project assessment, by the concentrated efforts in proposing integrated analyzes that aid the decision making. It also approaches two branches of the digital architecture: the computational design and the building information modeling. It also stimulates the integration of consolidated digital alternatives (CAD, Generative Systems) and the promising ones (BIM and Machine Learning) to the creative resources diversity, subsidizing the designers in the choice of the best solution, through decision-making methods and algorithms.

Keywords: *Patterns, BIM; Semantic Enrichment; Machine Learning; Architectural Design; Project Assessment.*

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Diagramas de Alexander – Sistemas, Interdependência e Forma	31
Figura 2. Diagramas de Alexander – Vila Indiana	32
Figura 3. Diagramas de Alexander – Conexões de parâmetros de projeto.....	33
Figura 4. Esquema genérico – símbolos, fronteiras e ligações	40
Figura 5. O mapa de sequência de decisão proposto por Andrade (2012)	44
Figura 6. Classes e subclasses de modelos de projeto digital propostos por Oxman (2006)	45
Figura 7. <i>Briefing</i> em várias etapas do ciclo de vida da edificação.....	52
Figura 8. Dendograma.....	56
Figura 9. Diagramas de Análise e Síntese da Forma e Semitreliça (Alexander, 1964; 1966).....	57
Figura 10. Mecanismo de Enriquecimento Semântico	58
Figura 11. Espectro de possibilidades para sistemas automatizados de análise de projeto AI BIM	59
Figura 12. Artefatos desta pesquisa.....	62
Figura 13. Processo de investigação proposto para esta pesquisa	64
Figura 14. Escolha dos Parâmetros de projeto	68
Figura 15. Algoritmização dos Parâmetros de projeto	68
Figura 16. Transcrição em BIM da geometria resultante da GF	69
Figura 17. Algoritmização de parâmetros de projeto por meio de programação visual em BIM	70
Figura 18. Classificação da informação da aplicação dos parâmetros de projeto..	71
Figura 19. Diagrama de aplicação típica da primeira classe de verificação.....	81
Figura 20. Diagrama de aplicação típica da segunda classe de verificação.....	82
Figura 21. Diagrama de aplicação típica da terceira classe de verificação.....	82
Figura 22. Estrutura de atributos em objetos BIM.....	83
Figura 23 – Atributos do modelo BIM.....	84
Figura 24. Método de Elbow.....	86
Figura 25. Classificação dos <i>parâmetros de projeto</i> quanto ao LoD e identificação das categorias de recomendação	89

Figura 26. Escala de Agrupamento dos parâmetros de projeto e identificação das classes de objeto	90
Figura 27. Fluxograma (ruas permeáveis)	91
Figura 28. Fluxograma (orientação solar para espaço externo)	92
Figura 29. Fluxograma (gradiente de intimidade)	93
Figura 30. Fluxograma (zona de piso)	93
Figura 31. Zonas de Pisos (classificação BIM)	95
Figura 32. Ruas Permeáveis	98
Figura 33. Ruas Permeáveis: rotina de gerenciamento da informação	98
Figura 34. Orientação para espaço externo	99
Figura 35. Orientação para espaço externo: rotina de gerenciamento da informação	100
Figura 36. Gradiente de Intimidade	102
Figura 37. Gradiente de Intimidade: rotina de gerenciamento da informação	103
Figura 38. Modelo B: sensibilidade de variação	104
Figura 39. Zona de pisos	105
Figura 40. Zona de pisos: gerenciamento da informação	106
Figura 41. Amostra de exemplares dos dois tipos de derivação	108
Figura 42. Convertendo geometria (linhas) em objeto tipificado (paredes)	108
Figura 43. Zona de piso: (a) <i>room</i> e (b) <i>floor</i>	109
Figura 44. Instância numérica das soluções projetuais	110
Figura 45. Clusterização no Teste 1 sobre a amostra total sem normalização e sem análise de variância	113
Figura 46. Curva do método Elbow para o Teste 2 com a amostra total normalizada	114
Figura 47. Curva do Método Elbow para o Teste 3 com a amostra total agrupando atributos por grupo	114
Figura 48. Clusterização resultante do Teste 4 com os parâmetros de projeto representados pela média de seus atributos e normalização algorítmica	115
Figura 49. Clusterização resultante do teste 6 com a amostra original normalizada algoritmicamente	115

Figura 50. Clusterização resultante do Teste 9 com a amostra reduzida aos atributos do pattern de grau de intimidade	116
Figura 51. Teste 10.....	116
Figura 52. Clusterização resultante do Teste 11 com a amostra reduzida para os atributos do pattern de dureza de materiais nas zonas de piso	117
Figura 53. Cluster: medida de distância.....	119
Figura 54. Teste 12: dendograma <i>pattern</i> gradiente de intimidade.....	119
Figura 55. Teste 12: Clusters do dendograma <i>pattern</i> gradiente de intimidade...	120
Figura 56. Teste 13: dendograma 3 <i>parâmetros de projeto</i> (G2, G3 e G4)	122
Figura 57. Teste 13: dados organizados como o dendograma 3 <i>parâmetros de projeto</i> (G2, G3 e G4)	123
Figura V - Fluxograma (edifícios conectados).....	146
Figura XXII - Fluxograma (unidades ao redor do pátio)	158

LISTA DE QUADROS

Quadro 1. Tipos de Artefatos	61
Quadro 2. Processo de Investigação proposto para esta pesquisa.....	63
Quadro 3. Métodos para avaliação dos artefatos	72
Quadro 4. Estratégia projetual para o senso de urbanidade.....	79
Quadro 5. Estratégia projetual para o senso de habitabilidade.....	79
Quadro 6. Parâmetros de projeto parametrizáveis dentro da escala de aplicação	89
Quadro 7. Tipos de Agrupamento.....	90
Quadro 8 - Rotinas definidas para a implementação.....	110
Quadro 9. Resumo dos experimentos	112
Quadro 10 Código de classificação hierárquica.....	117
Quadro 11. Código de classificação hierárquica associado ao algoritmo Voor Hees	118

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

2D Duas dimensões

3D Três dimensões

ABDI Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial

ABNT Associação Brasileira de Normas Técnicas

AECO Arquitetura, Engenharia, Construção e Operação

AM Aprendizado de Máquina

APC Avaliação Pré-Construção

APO Avaliação Pós-Ocupação

BDS *Building Description System* (Sistemas de Descrição da Edificação)

BIM *Building Information Modeling* (Modelagem da Informação da Construção)

CAD *Computer-Aided Design* (Projeto Auxiliado por Computador)

DAD *Digital Architectural Design* (Projeto Arquitetônico Digital)

DBMS *Data-Base Management Systems* (Sistemas de Gerenciamento de Banco de Dados)

DS *Design Science* (Ciência do Projeto)

DSR *Design Science Research* (Pesquisa da Ciência do Projeto)

EC Elemento de Construção

ESBIM Enriquecimento Semântico em BIM

GF Gramática da Forma

GLIDE *Graphical Language for Interactive Design* (Linguagem Gráfica para Projeto Interativo)

HIS Habitação de Interesse Social

IA Inteligência Artificial

IFC *Industry Foundation Class* (formato de dados não proprietários)

IoT *Internet of things* (Internet das Coisas)

LoD *Level of Development* (Nível de Detalhamento)

MCMV Minha Casa Minha Vida

OOP *Object-Orient Programming* (Programação Orientada a Objeto)

RNA Rede Neural Artificial

SGs Sistemas Generativos

SIMMLAB Laboratório para Simulação e Modelagem em Arquitetura e Urbanismo -UFRGS

UC Unidade de Construção

CC Complexo de Construções

U-I Agrupamento: Urbanidade-Independente

UH-I Agrupamento: Unidade Habitacional-Independente

UH-O Agrupamento: Unidade Habitacional-Organização

UH-P Agrupamento: Unidade Habitacional-Posição

VPL *Visual Programming Language* (Linguagem Visual de Programação)

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	19
1.1. Objetivo	22
1.2. Hipótese.....	23
1.3. Justificativa.....	24
1.4. Estrutura do trabalho	27
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	29
2.1. Parâmetros de projeto: aplicação como método projetual.....	29
2.2. Arquitetura Digital	37
2.3. <i>Design</i> Computacional.....	46
2.4. BIM e Aprendizado de Máquina	50
3. MÉTODO	60
3.1. Design Science Research (DSR).....	60
3.2. Fases da DSR.....	62
3.2.1 Encontrar o problema na prática.....	65
3.2.2 Obter conhecimento geral e profundo sobre o tema.....	66
3.2.3 Examinar o potencial de investigação	66
3.2.4 Criar uma solução inovadora e desenvolver um artefato	67
3.2.5 Implementar uma solução e testar	71
3.2.6 Refletir sobre a aplicabilidade	73
3.2.7 Identificar e analisar as contribuições teóricas.....	73
4. POTENCIAL DE INVESTIGAÇÃO	75
4.1. A gramática da forma para análise e geração de formas no projeto de HIS	75
4.2. Parâmetros de projeto em habitações coletivas	77
4.3. Modelos teóricos	80

4.3.1 Modelo para definição de algoritmo	80
4.3.2 Modelo para identificação das categorias de automatização.....	81
4.3.3 Modelo para organização dos atributos de um objeto BIM	83
4.3.5 Modelo para extração automática dos dados do modelo BIM	84
4.3.6 Modelo para clusterização não supervisionada.....	84
5. FORMULAÇÃO DA SOLUÇÃO.....	87
5.1. Escolha dos parâmetros de projeto aplicáveis à construção de algoritmos para o enriquecimento semântico projetual.....	88
5.2. Algoritmização dos parâmetros de projeto.....	90
5.2.1 Ruas permeáveis (<i>51-green streets</i>)	91
5.2.2 Orientação solar para espaço externo (<i>105-south facing outdoors</i>)	92
5.2.3 Gradiente de intimidade (<i>127-intimacy gradient</i>).....	92
5.2.4 Zonas de pisos (<i>233-floor surface</i>)	93
5.3. Associação do Modelo de Informação ao algoritmo.	94
5.4. Suporte à tomada de decisão projetual.....	96
6. IMPLEMENTAÇÃO E TESTES	97
6.1. Alternativas de implementação	97
6.2. Transcrição em BIM da geometria resultante da GF paramétrica	106
6.3. Classificação das soluções projetuais.....	111
7. REFLEXÃO SOBRE A APLICABILIDADE.....	125
8. CONTRIBUIÇÕES TEÓRICAS	129
9. CONCLUSÃO	131
10. APÊNDICE A	143

1. INTRODUÇÃO

Da primeira abordagem sistemática, proposta por Jones (1963), ao interesse nos sistemas de processamento de informações e sistemas de suporte às decisões de projeto, importantes conceitos foram identificados e nos permitem compreender a complexidade do processo de projeto (MOREIRA, 2007). Como por exemplo, a compreensão da sequência de decisões compostas pela análise, síntese e avaliação, parte de um processo de projeto flexível, posto de forma conjunta, articulado e com ciclos iterativos e influenciados por diversos agentes. Ou ainda, de que algoritmos matemáticos podem ser usados para dar uma ideia da relação e soluções onde cada variante de projeto pode satisfazer cada requisito mínimo.

Neste sentido, estratégias paramétricas e algorítmicas têm se tornado particularmente importantes, por servir de base para distintas abordagens metodológicas (MEREDITH, 2008). Como apresentado por Hudson (2010), o processo paramétrico de projeto é definido como o desenvolvimento de um modelo ou descrição de um problema, onde a representação é baseada nas relações entre objetos controlados por variáveis: os parâmetros. Em suma, a modelagem paramétrica traz como potencial a dinâmica de alteração de parâmetros para auxílio na tomada de decisão, que quando aplicada com objetivo generativo, como o uso das Gramáticas da Forma (GF), Algoritmos Genéticos, Autômatos celulares e Fractais, aumenta a probabilidade de ocorrências aleatórias resultando na diversidade de soluções.

De acordo com Konis *et al.* (2016), o *Grasshopper*, utilizado com *Rhino 3D*, atualmente também integrado ao *ArchiCAD*, é uma linguagem visual de programação (*Visual Programming Language* – VPL) comumente usada na indústria de construção, mas outros *plug-ins* como *Dynamo* e *Marionete* estão se tornando mais proeminentes. Esses *plug-ins*, assim como *Generative Component* para o *AECOSim*, permitem que modelos de concepção digital formativo, generativo e baseado em desempenho (OXMAN, 2006), possam ser integrados a ambientes de Modelagem da Informação da Construção (*Building Information Modeling* – BIM), evitando assim o rompimento do fluxo de informação e permitindo o reuso do modelo entre as fases de concepção e desenvolvimento (RUSCHEL, 2014).

Entretanto, como evidencia Ostwald (2010), precisa-se ter cuidado não apenas na definição do sistema, mas também na apresentação e explicação da proposta, demonstrando que existe um rigoroso **protocolo de avaliação**, que tem como objetivo auxiliar o projetista a escolher o melhor resultado de um conjunto de inúmeras possibilidades geradas pelo computador.

Atualmente na atuação dos escritórios nacionais, de modo geral, verifica-se pouco o uso de ferramentas computacionais como apoio à etapa criativa, embora estas tenham sua potencialidade evidenciada por diversos autores nacionais e internacionais, tanto em Projeto Auxiliado por Computador (CAD) (MONREAL, A.; JACAS, J. 2004; PENTTILÄ 2006; ARAÚJO; CELANI, 2016), como em BIM (PENTTILÄ 2006; EASTMAN, 2008; WIERZBICKI; DE SILVA, 2011; MORAIS *et al.* 2014; JANSSEN, P. *et al.* 2017).

Constata-se, ademais, que a maioria das pesquisas e publicações nacionais relativas à BIM ainda se concentram nas etapas avançadas do projeto: gestão, execução e operação, o que não promove contribuição ao processo de projeto em sua completude (LOVE, *et al.* ,2014; LOVE, *et al.*, 2015; KASSEM, *et al.*, 2015; KOUTAMANIS, 2017). O resultado apresentado por Checcucci *et al.*(2011), com o objetivo traçar um panorama da difusão das tecnologias BIM no Brasil, reforça esta questão constatando que apenas 21% dos artigos¹ abordam o tema: “o uso de BIM no processo de projeto arquitetônico”, e ainda que, dentre os artigos levantados, nenhum aborda a efetiva aplicação nas etapa de concepção.

Apesar da crescente difusão do BIM no Brasil, sua aplicação continua arraigada às etapas mais avançadas do desenvolvimento projetual, todavia é na etapa de concepção do projeto arquitetônico que se demanda dos projetistas ciência das consequências de todas as decisões de projeto, visto que a série de decisões inerentes à esta etapa têm uma forte influência na qualidade espacial da edificação.

¹ Levantamento de abrangência temporal de 2005 a 2010, utilizando como fonte de pesquisa anais de eventos técnicos-científicos; o banco de teses do portal da CAPES e o portal Domínio Público; revistas eletrônicas nacionais e bases de dados internacionais.

Tal visão subestima e negligencia informações que antecedem o projeto, colocando muita ênfase na subjetividade das soluções projetuais, enquanto os projetos podem ser explicitamente baseados em informações precedentes e tipos (KOUTAMANIS, 2017), ou seja, as informações que são levantadas na etapa de análise e que antecedem e definem a síntese acabam se perdendo ao longo do processo.

Koutamanis (2017) sugere que a maior perda está no grupo das informações não geométricas. Sacks *et al.* (2019) sugerem ainda que grande parte da semântica permanece implícita aos dados internos dos sistemas BIM, portanto, inacessíveis a sistemas genéricos de revisão de modelos que exigem explicitamente parâmetros definidos, agregações, conexões e outras estruturas topológicas. Neste sentido, um processo chamado Enriquecimento Semântico foi proposto para complementar modelos BIM com informações ausentes para uma aplicação ou necessidade específica (BELSKY *et al.*, 2016).

O **Enriquecimento Semântico em BIM** (ESBIM) pode auxiliar na avaliação dos impactos e a possibilidade da edificação em atingir seus objetivos práticos e sociais durante a etapa de **Avaliação Pré-Construção** (APC), termo sugerido por Rappl e Medrano (2017), pela relação de semelhança com o termo Avaliação Pós-Ocupação (APO). Os autores exemplificam a APC como: a avaliação de um projeto em relação às especificações do programa de necessidades; a avaliação do próprio programa de necessidades, na qual pode-se verificar se o projeto está de acordo com os requisitos dos clientes, diretrizes de qualidade, com o orçamento, normas e outras exigências; e também o relatório ambiental, no qual se examina a probabilidade de impacto do projeto sobre o ambiente (VOORDT; WEGEN, 2013).

Desta forma, o enorme impacto que BIM pode ter no subsídio a decisões qualificadas tomadas na fase de concepção, devido ao rápido retorno sendo aplicado não apenas como meio de armazenar e gerenciar conhecimentos do edifício, mas também contribuindo para a transformação e a geração de novas soluções de projeto (EASTMAN *et al.*, 2008), está acima de tudo, em sua capacidade de coletar todas as informações relevantes disponíveis e organizá-las coerentemente, mesmo na ausência de geometria (KOUTAMANIS, 2017).

Sobre o conhecimento qualitativo, revisou-se a literatura, constatando em Alexander *et al.* (1977) e em sua sistematização criativa na solução de problemas do projeto, através dos *parâmetros de projeto*², a capacidade de amparar a construção de algoritmos capazes de explorar ou validar novas soluções na concepção de projetos, que enfoquem a relação ser humano – ambiente, através de ferramentas que permitem BIM.

Revisitar Alexander, neste contexto, contribui nas três direções sugeridas por Daves e Ostwald (2017) para o futuro da linguagem de padrões de projeto:

“The identification and organisation of these criticisms suggests three possible directions for the future of pattern languages. The first is to consider A Pattern Language as a historical artefact worthy of further exploration. The second investigates the concept of pattern languages including whether or not they can be rigorously tested and whether they are practical design methodologies, the third is to develop new pattern languages without the restrictions of Alexander’s ontological and epistemological positions.” (DAVES; OSTWALD, 2017).

Isto posto, a problemática consiste em analisar como BIM pode ser introduzido na etapa de concepção para incluir elementos qualitativos na avaliação pré-construção de diversas soluções, trazendo uma contribuição efetiva à tomada de decisão no processo de projeto.

1.1.Objetivo

O objetivo desta pesquisa é propor a aplicação da abordagem BIM na etapa de concepção para a avaliação das derivações apresentadas por sistemas generativos, através do Enriquecimento Semântico em BIM (ESBIM), como metodologia de Avaliação Pré-Construção (APC) no suporte ao processo de projeto. Propondo-se, assim, aproximar dois ramos da arquitetura digital, isto é, o design computacional e a modelagem da informação da construção. Estimulando assim, a integração de alternativas digitais à diversidade de recursos criativos capazes de subsidiar os

² Nesta pesquisa opta-se adotar a tradução sugerida por Barros e Kowaltowski (2013) de *Pattern* para *parâmetros de projeto*: “Considerando o caráter prescritivo associado ao termo padrão na língua portuguesa bem como em arquitetura ressalta-se que, muito embora a tradução literal como padrões, o conteúdo e o caráter propositivo dos parâmetros de projeto indicam sua interpretação enquanto parâmetros de projeto, no sentido de serem elementos cuja variação de valor contribui e orienta a solução de um problema no todo sem lhe modificar a natureza.” (BARROS; KOWALTOWISKI, 2013).

projetistas na escolha da melhor solução. Esta proposição será validada no contexto do projeto de conjuntos HIS, fomentando a possibilidade de incorporação de objetivos práticos e sociais, necessários a avaliação de projeto ao BIM.

Destacam-se como objetivos específicos:

- (i) Selecionar os parâmetros de projeto, dentre os originalmente identificados por Alexander *et al.* (1977), aplicáveis à construção de algoritmos para o enriquecimento semântico projetual.
- (ii) Algoritmizar os parâmetros de projeto por meio de Programação Visual em BIM.
- (iii) Categorizar um grande universo de soluções qualificadas em BIM para apoio à escolha de alternativas;

1.2.Hipótese

A hipótese que motivou esta pesquisa pressupõe que o enriquecimento semântico associado a propriedades em modelos BIM auxiliam o projetista, ainda na etapa de concepção, a escolher o melhor resultado, através da avaliação de projeto, de um conjunto de inúmeras possibilidades geradas pelo computador, posto que:

- As avaliações permitem indicar questões que podem induzir ao aprimoramento de projetos (“processo” e “produto”), contribuir para a formação de novas teorias, desenvolver novas ferramentas e também revelar fenômenos imprevistos e não intencionais, positivos ou negativos (VOORDT; WEGEN, 2013).
- O processo de projeto ainda é pouco integrado à avaliação (APC e APO).
- Modelos de Informação da Construção podem ser elaborados e evoluir de detalhamento variando-se o nível de desenvolvimento, combinando tecnologias geométricas e informações não geométricas.
- É na síntese que devem ser promovidas as soluções possíveis para os pontos levantados na análise, visto que múltiplas soluções instigam a criatividade.
- Não devem ser procuradas soluções únicas ao problema, mas várias alternativas consideradas e combinadas no decorrer do processo.

- Alternativas digitais podem auxiliar na tomada de decisão e atribuir maior agilidade durante o processo de projeto.
- Torna-se necessário criar estratégias que auxiliem os projetistas a lidarem com um número cada vez maior de variáveis e dados.

1.3.Justificativa

Frente à grande demanda por moradias no Brasil o tema da HIS surge como recorrente objeto de estudo de pesquisadores na tentativa de responder ao problema social e urbano gerado ao longo dos anos. Estudos nacionais (BONDUKI, 1998; ABIKO; ORSTEIN, 2002; KOWALTOWSKI, *et al*, 2006 e 2018; BOUERI, 2009; MIRON, 2008; BRANDÃO, 2011; ACOLIN, *et al*, 2019) bem como internacionais (HIRST, 1996; HILLS, 2007; DUARTE, 2007; BUCKLEY, *et al*, 2016; SALDAÑA-MÁRQUEZ, *et al*, 2018) voltam-se principalmente à caracterização, análise e avaliação dos conjuntos e unidades habitacionais, com ênfase na qualidade do entorno e da edificação sob a perspectiva do usuário, buscando subsidiar a solução de problemas como a monotonia e repetição gerados pela precariedade das soluções.

Os problemas desta baixa qualidade dos projetos de HIS no Brasil podem estar relacionados à falta de metodologia estruturada e sistemática com foco nas necessidades do cliente, ao pouco uso da tecnologia de informação, à falta de ferramentas automatizadas para análise de projetos e à falta de histórico sobre os requisitos do cliente ao longo do ciclo de vida do empreendimento (KAMARA; ANUMBA; EVBUOMWAN, 2002 *apud* MIRON, 2008). Ou ainda, como sugerem Rappl e Medrano (2017), pela ausência de métodos e pesquisas sobre análise e avaliação de projetos HIS com potencial para o campo de Avaliação Pré-Construção (APC). De acordo com os autores, a APC poderia tornar-se um instrumento essencial à qualidade do projeto e da política habitacional como um todo.

Neste sentido, a utilização de diretrizes de projeto e referências projetuais, que levam em consideração a percepção de valor dos usuários, pode amenizar a falta de participação deste ao longo do processo de desenvolvimento de novos conjuntos,

tornando esses parâmetros referenciais na busca de melhores alternativas na evolução projetual (MORAIS, 2016).

Vaz (2011) reforça também essa prerrogativa, onde os precedentes de projetos são extremamente importantes para a área de arquitetura. Para ele, em relação ao ambiente construído, podem-se selecionar padrões de referência que sejam significativos em relação à temática abordada, como bons exemplos de projeto.

Apesar da aplicação do suporte a repertório de projeto ser um assunto que remonta ao primeiro século antes de Cristo, quando o arquiteto, engenheiro e escritor romano Marco Vitrúvio Polião listou os procedimentos adequados para gerar, por meio de uma boa prática, bons projetos urbanísticos e arquitetônicos, seu potencial ainda pode ser explorado principalmente na busca por soluções inovadoras de projeto, e ampliado com a aplicação da tecnologia de informação e comunicação.

Para Mitchell (2008), uma das novas possibilidades do uso da informática é a utilização de um repertório criado por regras próprias da arquitetura, através de seus elementos, os quais criariam uma gramática específica. Assim, o papel do arquiteto seria organizar esta gramática e suas regras, possibilitando a automação do processo de projeto.

Dentre os processos generativos com aplicações distintas na área da arquitetura, como o uso das Gramáticas da Forma, Algoritmos Genéticos, Autômatos celulares e Fractais, estudos recentes (DUARTE, 2007; MUSSI, 2011; MENDES, 2014; MORAIS *et al*, 2014) demonstram a potencialidade do uso da Gramática da Forma como uma ferramenta de suporte ao projeto de implantação de conjuntos habitacionais.

Esta potencialidade incrementa a quantidade de resultados, de composições com maior diversidade e qualidade espacial, que podem ser utilizados para apoiar a tomada de decisão na etapa de concepção de novos conjuntos habitacionais de interesse social, primordialmente para a fase de estudos de implantação e inserção urbana, bem como na definição da própria unidade habitacional (MAYER, 2012).

Em sua tese de doutorado Letícia Mendes (MENDES, 2014) realiza a análise de alguns projetos de conjuntos habitacionais nacionais e internacionais, identificando suas principais características do ponto de vista da implantação, por meio da

inferência de regras de composição utilizando o formalismo da Gramática da Forma, de Stiny e Gips. Em seguida, é feito um levantamento de exemplos de aplicação de métodos paramétricos e generativos no desenvolvimento de projetos de HIS, nos contextos da pesquisa e do ensino de projeto.

Apesar do acervo destas pesquisas indicar robustez, é escasso seu reflexo em programas voltados à moradia. Talvez, pelo fato de não haver formas consagradas de avaliação da habitação social no Brasil e no mundo, como afirmou Doris Kowaltowski, em recente entrevista concedida à Revista Fapesp (DESTRI; 2019). O estudo coordenado por ela acerca das publicações voltadas ao maior programa habitacional do Brasil, o Minha Casa Minha Vida (MCMV), levantou que apesar do grande volume as pesquisas ainda falham em oferecer uma visão detalhada acerca das moradias (KOWALTOWSKI, D. *et al*, 2015 e 2019).

Constata-se assim, que apesar de todo o esforço teórico e acadêmico na tentativa de solucionar os problemas da HIS, na prática esta investida não tem surtido efeito. Talvez por não considerar que todas as etapas devem estar interligadas: do levantamento dos requisitos, que constituem o programa de necessidades, à sua própria avaliação na etapa de uso, como um processo dinâmico.

Abordagens recentes têm considerado o programa de necessidades como um processo de interação entre as partes interessadas em direção a um alinhamento subjacente à ação coordenada, não limitado aos estágios que antecedem à síntese, mas, continuo ao longo do ciclo de vida (TZORTZOPOULOS *et al.*, 2006; PATON; DORST, 2011).

Podemos, desta forma, considerar que as novas perspectivas do programa de necessidade, agora dinâmico, alinha-se diretamente às ambições da modelagem de informação da construção. Visto que ambos reconhecem a interconexão entre produto e processo, enfatizam a importância da integração para coerência, consistência e aceitam a continuidade, apoiando considerações sobre o ciclo de vida e facilitando as transições entre etapas (KOUTAMANIS, 2017).

Considerando que BIM é capaz de suportar estas novas abordagens, verifica-se a potencialidade e possibilidade de renovação da aplicação de parâmetros de projeto,

amparando a construção de algoritmos capazes de explorar e autenticar novas soluções na concepção de projetos podendo ser validada no contexto do projeto de conjuntos habitacionais de interesse social. Fomentando a possibilidade de incorporação de objetivos práticos e sociais, necessários a avaliação de projeto, à modelagem da informação, mantendo o sistema de concepção dinâmico, contendo entradas e saídas de várias ações e interações, ao longo de todo o ciclo de vida.

A inovação desta pesquisa está em colaborar para os estudos nas áreas de Modelagem da Informação e Processo de Projeto, com ênfase na avaliação de projeto. A maior contribuição está em aproximar dois ramos da arquitetura digital: o design computacional e a modelagem da informação da construção. Espera-se, com isso, estimular a integração de alternativas digitais à diversidade de recursos criativos subsidiando os projetistas na crítica reflexiva e escolha da melhor solução.

1.4. Estrutura do trabalho

A estrutura do trabalho é composta por nove capítulos, sendo: Introdução, Fundamentação Teórica, Método, Potencial de Investigação, Formulação da Solução, Implementação e Testes, Reflexão sobre a Aplicabilidade, Contribuições Teóricas e Conclusão.

Neste Capítulo 1, **Introdução**, apresenta-se a problemática abordada na pesquisa, destacam-se o objetivo, a hipótese levantada e a justificativa que levou à realização deste trabalho.

A partir do Capítulo 2, **Fundamentação Teórica**, discute-se o referencial teórico dos principais eixos temáticos desta pesquisa: (2.1) Aplicação de parâmetros de projeto como método projetual (2.2) Arquitetura Digital e o (2.3) Design Computacional. Por fim, abordam-se conceitos da (2.4) Modelagem de Informação na Construção associados às técnicas da Inteligência Artificial (IA) na otimização de processos para a tomada de decisão projetual.

Apresenta-se no Capítulo 3, **Método**, a metodologia *Design Science Research* (DSR) utilizada no trabalho assim como o delineamento da pesquisa e a sistemática prevista para avaliação dos artefatos propostos.

No Capítulo 4, **Potencial de investigação**, evidencia-se a potencialidade de aplicação no projeto de HIS, apresentam-se os instrumentos para aplicação dos parâmetros de projeto em HIS e os modelos para a construção dos artefatos.

No decorrer do Capítulo 5, **Formulação da Solução**, apresentam-se os artefatos criados, os Métodos para implementação dos parâmetros de projeto em ambiente computacional associado à GF e BIM em projetos de HIS e a sua instanciação correspondente.

No Capítulo 6, **Implementação e Testes**, realizam-se e discutem-se o processo de desenvolvimento da instanciação por meio de simulação.

No Capítulo 7, **Reflexão e Aplicabilidade**, apresentam-se e discutem-se os resultados alcançados através dos testes de implementação.

No Capítulo 8, **Contribuições Teóricas**, discutem-se as principais contribuições teóricas do trabalho, comparando o ganho isolado ao compartilhado das soluções.

No Capítulo 9, **Conclusão**, discutem-se os resultados obtidos no trabalho, verificam-se se os objetivos foram alcançados, quais as contribuições da pesquisa. Apresentam-se também as limitações da pesquisa e sugerem-se trabalhos futuros para a área.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Diversos autores constroem coletivamente os “métodos do saber projetar” a partir de diferentes pesquisas e estudos, compartilhados através de simpósios e conferências. Como aponta Moreira (2007), os *Design Methods* repercutiram em áreas diversas e deram importantes contribuições, como a avaliação pós-ocupação, o programa arquitetônico, o *Design Thinking*, a Inteligência Artificial (IA) e a aplicação de técnicas computacionais para solucionar os problemas de projeto e compor as formas dos objetos. Da primeira abordagem sistemática, proposta por Jones (1963), ao interesse nos sistemas de processamento de informações e sistemas de suporte às decisões de projeto, importantes conceitos foram identificados e nos permitem compreender a complexidade do processo de projeto.

Como por exemplo, a compreensão da sequência de decisões compostas pela análise, síntese e avaliação, como parte de um processo de projeto flexível, posto de forma conjunta, articulado e com ciclos iterativos e influenciados por diversos agentes. Ou ainda, de que algoritmos matemáticos podem ser usados para dar uma ideia da relação e soluções onde cada variante de projeto pode satisfazer cada requisito mínimo.

Neste sentido, o presente capítulo apresenta o referencial teórico dos principais eixos temáticos desta pesquisa, caracterizando inicialmente os Parâmetros de Projeto como método projetual. Posteriormente, investiga-se a Arquitetura Digital e seus dois principais ramos: o *Design* Computacional e a Modelagem da Informação na Construção. Por fim, abordam-se conceitos e processos que auxiliam a tomada de decisão na prática do projeto colaborativo através de técnicas da Inteligência Artificial.

2.1. Parâmetros de projeto: aplicação como método projetual

Christopher Alexander é um legítimo representante do *Design Methods Movement* (1960). Como parte da 1ª geração de pensamento sobre metodologia projetual, Alexander estabeleceu a condição do programa de necessidades na definição

de variáveis, bem como desenvolveu um processo de projeto sistemático baseado na teoria de probabilidades e grafos, cuja aplicação dependia do auxílio computacional.

O livro *“A Pattern Language”* publicado com a colaboração de Sara Ishikawa e Murray Silverstein, introduziu discussões que repercutem até hoje em diversas áreas além da Arquitetura e Matemática, como por exemplo, na Engenharia (NAJARI, 2016), na Gestão da inovação (FORTINO, 2008) e na Ciência da Computação (FORTINO, 2008; CHEN, 2010; VELOSO, 2014). Essa abrangência reflete a transdisciplinaridade de sua pesquisa explorando campos como biologia, matemática, ciência da computação, teoria da informação e cibernética, para propor métodos racionais ao projeto arquitetônico.

As influências mais claras são identificadas inicialmente pela apropriação da teoria cibernética de Ross Ashby (ALEXANDER, 1964) que remete à capacidade de adaptação homeostática em encontrar um equilíbrio contra perturbações. Essa teoria foi aplicada por Alexander, com o auxílio de programas computacionais, para resolver problemas através de subconjuntos cujos requisitos são conectados como parte de uma estrutura coerente e hierarquizados em uma árvore de decisão.

A análise proposta por Alexander da síntese formal estruturada, através de um diagrama em forma de árvore de decisão, busca o equilíbrio adaptativo entre forma e os múltiplos requisitos de projeto, aproxima-se do esquema de crescimento e forma dos fenômenos naturais apresentados pelo biólogo e matemático escocês D'Arcy Wentworth Thompson em *On Grow and Form*.

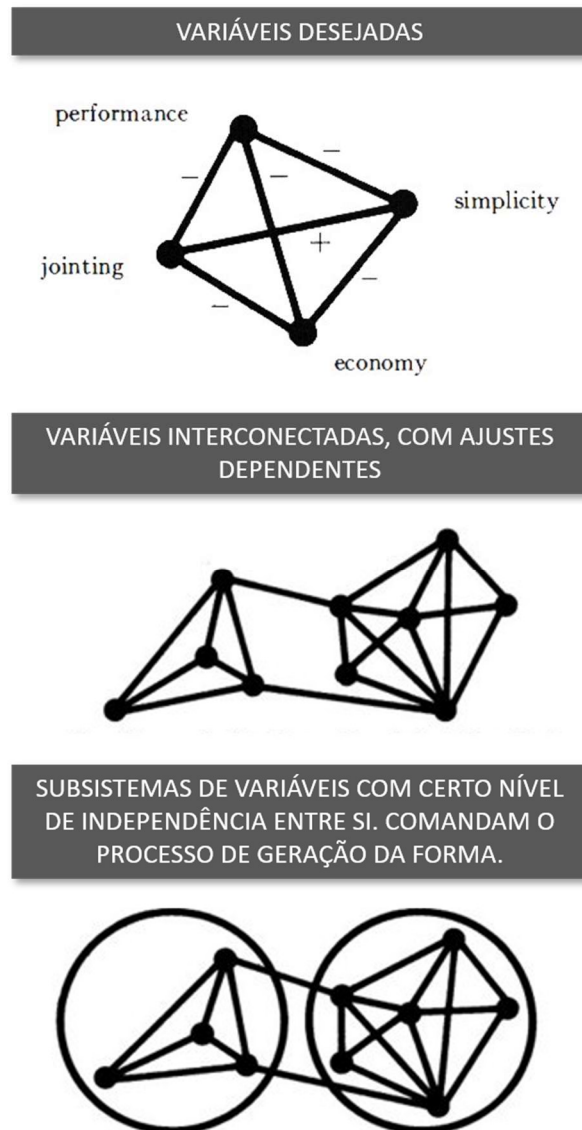
“This is what lies behind D' Arcy Thompson's remark that the form is a diagram of forces. Once we have the diagram of forces in the literal sense, this will in essence also describe the form as a complementary diagram of forces.” (ALEXANDER, 1964)

Desta forma Alexander propôs o método de projeto como a tentativa de moldar novos sistemas, novas estruturas, como sendo o caminho inverso adotado pelos cientistas que tentam compreender e identificar as estruturas existentes.

“Scientists try to identify the components of existing structures, designers try to shape the components of new structures.” (ALEXANDER, 1964)

Para Alexander, a estrutura significava a forma que manifesta informação, ou seja, os problemas de projeto devem ser decompostos em subsistemas e com suas inter-relações definidas, para que então seja alcançada a forma que responda ao melhor equilíbrio entre eles, como ilustra a Figura 1.

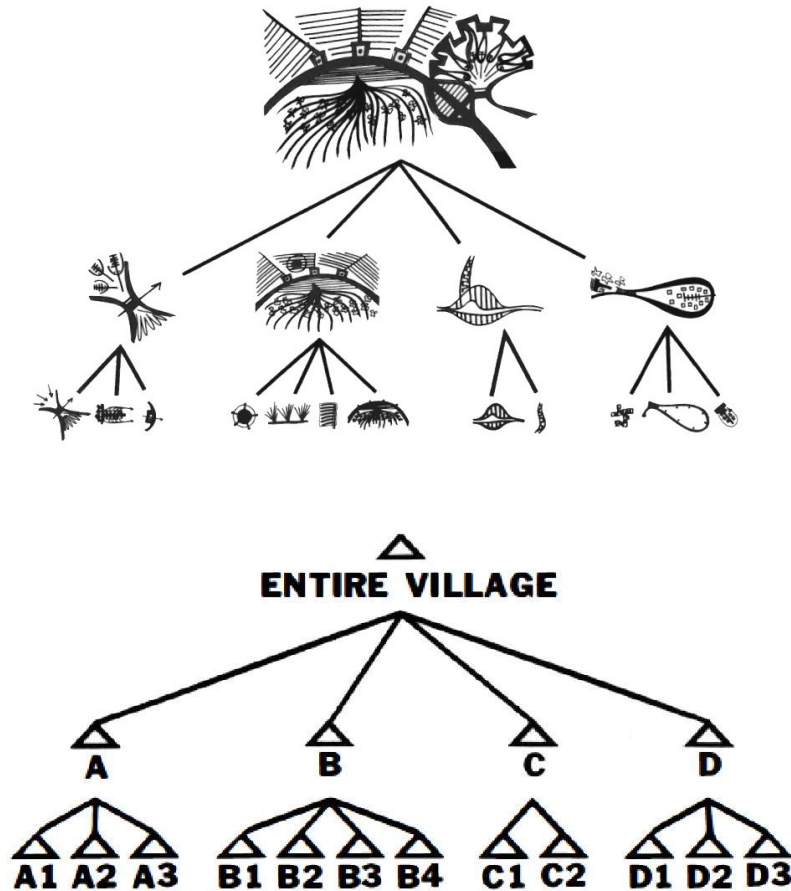
Figura 1. Diagramas de Alexander – Sistemas, Interdependência e Forma



Fonte: Adaptado de ALEXANDER, C. Notes on the Synthesis of Form. Cambridge, Harvard University Press, 1964.

A Figura 2 ilustra o diagrama da aplicação do método proposto no projeto de uma Vila Indiana, cada croqui sugere uma interpretação espacial correspondente a um subconjunto de requisitos. A solução ideal, por sua vez, seria a associação correspondente dos nós até o nó raiz.

Figura 2. Diagramas de Alexander – Vila Indiana

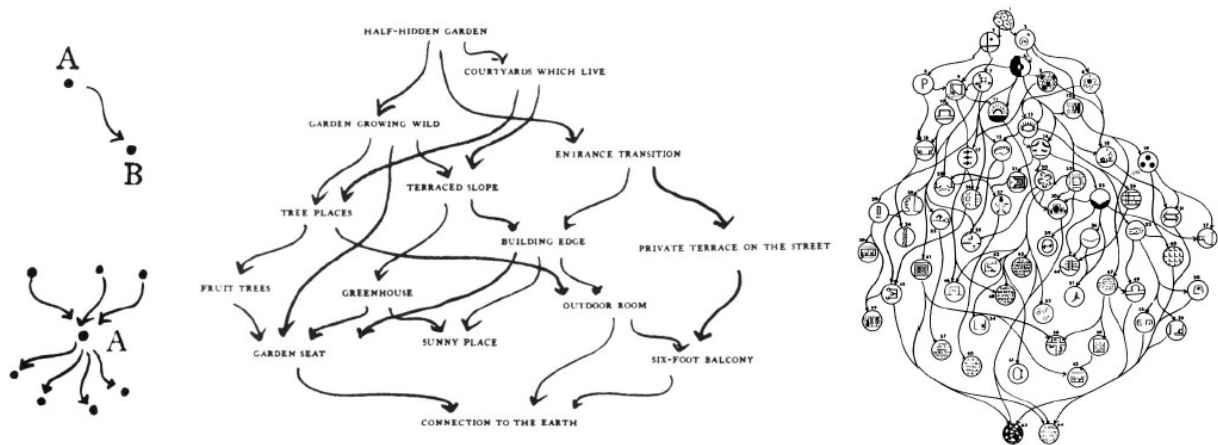


Fonte: ALEXANDER, C. Notes on the Synthesis of Form. Cambridge, Harvard University Press, 1964.

Apesar da tradução para a língua portuguesa considerar “*pattern*” como “padrão”, o conteúdo e o caráter propositivo indicam sua interpretação enquanto **parâmetros de projeto**, no sentido de serem elementos cuja variação de valor contribui e orienta a solução de um problema no todo sem lhe modificar a natureza (BARROS; KOWALTOWSKI, 2013).

Fazendo a transição do genérico conceito do diagrama para o de parâmetros de projeto, Alexander compreende cada parâmetro de projeto como um conjunto semiautônomo de regras generativas para lidar com problemas específicos em diferentes escalas do ambiente (VELOSO, 2014). Essas regras associam um contexto, a interação de seu subsistema de forças e a configuração espacial que garante o equilíbrio entre forças (ALEXANDER, 1979), sem que um parâmetro de projeto possa alterar o equilíbrio de outro, compondo a linguagem como uma rede hierárquica na forma de cascata como ilustra a Figura 3.

Figura 3. Diagramas de Alexander – Conexões de parâmetros de projeto



Legenda: Esquerda: Conexão de parâmetros de projeto. Centro: Cascata de parâmetros de projeto da linguagem de um jardim. In: Alexander, C., **The Timeless Way of Building**. New York, Oxford University Press, 1979, 313-314. Direita: Cascata de parâmetros da linguagem para um centro comunitário, In: Valena, T., Avermaete, T., and Vrachliotis, G., eds., **Structuralism Reloaded: Rule-Based Design in Architecture and Urbanism**. Stuttgart, Axel Menges, 2011, 61.

Alexander *et al.* (1977) definiram a obra como a apresentação de uma possível linguagem e não a única, enfatiza-se que linguagens são dinâmicas e refletem cada época. Neste sentido, os autores evidenciam dois objetivos principais: o primeiro envolve a possibilidade de infinitas combinações entre os parâmetros de projeto; o segundo, a premissa de que o projetista considere as características locais específicas contribuindo na adequação e/ou criação de novos parâmetros de projeto, configurando assim importância e atemporalidade das contribuições feitas.

O processo de projeto centrou-se na relação entre a forma e o seu contexto, e utilizou um método de decomposição que identificou quais aspectos de um problema de projeto são mais bem considerados como subproblemas com base em uma análise ponderada das relações entre todas as variáveis de projeto (LOVE, 1997). Este processo foi saudado como um grande avanço na discussão do projeto sistemático. Porém, embora parecesse ser quase completamente automático, dependia da capacidade de um projetista para identificar as variáveis relevantes e a relação entre elementos de projeto.

Como destaca Love (1997), Alexander reconheceu as dificuldades epistemológicas e ontológicas subjacentes ao seu processo de desconstrução. Publicando, em meados da década de 1970, um processo projetual

epistemologicamente e ontologicamente mais sofisticado: “*A Pattern Language: Towns – Buildings – Construction*” (1977) e “*The timeless way of building*” (1979).

Originalmente cada parâmetro de projeto conecta-se a outros, que podem ser “maiores”, mais abrangentes, ou “menores”, mais específicos. Ou seja, nenhum parâmetro é apresentado de maneira isolada, ele existe porque é sustentado e sustenta outros parâmetros (ALEXANDER *et al.*, 1977). A obra em questão consiste na coletânea de 253 parâmetros de projeto que, de acordo com suas relações, estabelecem uma rede formada por uma lista explicativa de situações recorrentes em projetos, caracterizadas por meio de parâmetros de projeto, que vêm acompanhadas de um exemplo arquetípico, na forma gráfica, que descreve o problema e a essência da solução (VOORDT; WEGEN, 2005). Os parâmetros identificados buscam contribuir para alcançar a qualidade sem nome, fenômeno identificado em seu livro *The timeless way of building* (ALEXANDER, 1979).

O conjunto de parâmetros está dividido em 36 subgrupos, apresentados por parágrafos introdutórios curtos, que descrevem a função de cada subgrupo de requisitos e sua relação com o grupo anterior. Os assuntos tratados estão dispostos em uma estrutura linear partindo de questões mais amplas sobre cidades e comunidades e atingindo maior especificidade como casas, jardins e ambientes residenciais (OLIVEIRA E SOUSA; MOREIRA, 2013).

O formato da descrição de um parâmetro de projeto também foi identificado por Oliveira e Sousa e Moreira (2013) e apresentado em cinco partes: nome, exemplo, contexto, problema e solução. Estas características permitiram que “*A Pattern Language*” servisse como base de inspiração para diferentes pesquisadores na identificação de requisitos de qualidade capazes de auxiliar no processo criativo em diferentes tipologias. Como exemplos temos: na área de arquitetura escolar com a publicação de “*The language of school design*” (NAIR; FIELDING, 2005); em projetos de habitação coletiva (BARROS, 2008), projetos de bibliotecas (SOUSA, 2012); em sistema para avaliar e reestruturar a própria avaliação de um programa arquitetônico de necessidades, bem como perceber conexões inesperadas na escala da cidade (SILVA; PARAIZO, 2008) e em mobilidade urbana (TE BRÖMMELSTROET *et al.*, 2018),

O conceito de padrões de projeto, apresentados em “*A Pattern Language*”, inspirou também estruturas que integram projetos interativos e inteligentes (WANG *et al*, 2018); como plataformas capazes de reunir dados coletivos, por sensores IoT (*Internet of things*), gerenciados por meio de estruturas da rede neural artificial (RNA) fornecendo a identificação de padrões emergentes e sinergias, levando a um aumento da eficiência e desempenho da gestão urbana, através de cidades inteligentes (ALLAM, 2019).

Frente às críticas significativas recebidas pela publicação sobre o pouco conteúdo científico dos parâmetros de projeto ou ainda a negação da legitimidade de um pluralismo de valores em arquitetura, autores como Broadbent (1979), Barros e Kowaltowski (2013) e Dawes e Ostwald (2017) ressaltam a importância dos parâmetros de projeto em demonstrar uma conexão direta à vivência humana no ambiente construído, percebida por um senso comum e entendimento natural.

No mapeamento de pesquisas anteriores, realizado por Dawes e Ostwald (2017), os autores organizam as 28 críticas em três níveis de agrupamentos temáticos: (i) conceitualização, (ii) desenvolvimento e documentação e (iii) implementação e resultados da teoria de Alexander.

O agrupamento temático dessas questões indica que a teoria proposta por Alexander: (i) ontologicamente confunde fenômenos objetivos e subjetivos, rejeita valores pluralistas e experiências alternativas, ignora as realizações políticas e sociais e aceita apenas uma maneira "correta" de construir. A teoria também (ii) depende de uma definição idiossincrática da "ciência" que se baseia em interpretações ambíguas da pesquisa empírica e evita as práticas científicas metodologicamente rigorosas (DAWES; OSTWALD, 2017).

Os autores apresentam ainda críticas quanto ao desenvolvimento da teoria de Alexander por: (i) não fornecer definições explícitas de termos, não se envolver com a literatura acadêmica ou fornecer validação empírica tradicional para reivindicações e, assim, falhar para atender aos padrões esperados academicamente. E, também (ii) falhar em se envolver em testes rigorosos de padrões; e (iii) incluir exemplos significativos de raciocínio falho e problemas lógicos.

Por fim, a implementação da teoria de Alexander também é criticada por: (i) ser excessivamente controladora e (ii) incluindo padrões defeituosos e recomendações para o projeto e, finalmente, (iii) não conseguir atingir o objetivo pretendido.

Contudo, a partir desta análise Daves e Ostwald (2017) revelam três direções possíveis para o futuro: a **primeira** é considerar *A Pattern Language* como um artefato histórico digno de exploração adicional. A **segunda** investigar o conceito de linguagens de padrões, incluindo se elas podem ou não ser rigorosamente testadas e se são metodologias práticas de projeto; a **terceira** é o desenvolvimento de novas linguagens de padrões sem as restrições das posições ontológicas e epistemológicas de Alexander. Essa via final de pesquisa tem o potencial de permitir uma mudança de paradigma na teoria da arquitetura, mas apenas se os padrões puderem ser rigorosamente testados (DAWES; OSTWALD, 2017).

As direções sugeridas por Dawes e Otwald (2017), bem como a iniciativa pioneira constatada por Barros e Kowaltowski (2013) na organização de dados da relação ser humano-ambiente para sustentar soluções projetuais, buscando ligar, de forma sistemática, o comportamento humano a elementos arquitetônicos; tornam a obra relevante para esta pesquisa de doutorado, uma vez que os parâmetros de projeto identificados podem contribuir como importante material de referência para a construção de algoritmos capazes de validar novas soluções na concepção de projeto, através de ferramentas de modelagem da informação da construção, criando assim, uma oportunidade de testar rigorosamente a aplicação dos parâmetros de projeto.

Resgatar a metodologia ou as soluções propostas por Alexander permite-nos salientar as reflexões e diretrizes atuais de projeto levantadas por pesquisadores da qualidade ambiental (BARROS; KOWALTOWSKI, 2013; OLIVEIRA E SOUSA; MOREIRA, 2013; TE BRÖMMELSTROET, *et al*, 2018; WANG *et al*, 2018; ALLAN, 2019) quanto à relação ambiente-comportamento humano, especialmente no que diz respeito à qualidade e diversidade socioambiental.

2.2.Arquitetura Digital

Os primeiros passos no desenvolvimento das interfaces gráficas foram dados entre as décadas de 1960-70, dando início à relação homem-computador. Em 1963, Ivan E. Sutherland desenvolveu uma “máquina de desenhar”, em sua tese de doutorado (MIT), denominada *Sketchpad*, que possibilitou o desenho interativo de elementos geométricos sobre um monitor de computador, sendo assim considerado o primeiro programa CAD, que posteriormente inspirou o desenvolvimento de uma interface muito mais sofisticada, por William M. Newman, em 1966 (MITCHELL, 1977).

Mitchell (1977) destacava a publicação de *Notes on the Synthesis of Form* (ALEXANDER, 1964), de Christopher Alexander, um marco na pesquisa de metodologia do projeto arquitetônico pelo grande entusiasmo despertado através da aplicação de métodos sistemáticos baseados em computação. Em *Notes on the Synthesis of Form*, Alexander propõe que o processo de projeto seja menos arbitrário e mais lógico, vinculando a forma ao seu contexto, favorecendo a racionalidade na tomada de decisão. Mais tarde, seu trabalho serviu como base conceitual para o desenvolvimento de importantes subsídios das arquiteturas digitais, como a parametrização, as gramáticas da forma e os sistemas generativos (NATIVIDADE, 2010).

Apesar da introdução dos novos conceitos metodológicos e da representação de objetos ter ganhado destaque no desenvolvimento das interfaces gráficas no início da década de 1960, somente nos anos finais da década de 1970 que a prática da Arquitetura auxiliada por computador começou efetivamente, quando algumas escolas de arquitetura começaram a integrar o projeto assistido por computador em seus programas pedagógicos (DOLLENS, 2002). Iniciando assim, o que Kalay (2004) considera como a Primeira Geração dos sistemas CAD de projeto.

Devido à robustez exigida pelos equipamentos e o alto custo agregado, o uso dos computadores estava restrito aos centros de pesquisa, como o dirigido por Charles M. Eastman no *Institute for Physical Planning at Carnegie Mellon University*, responsável pelo desenvolvimento do modelador com uma base de dados específica o *Building Description System* (BDS). Posteriormente, o sistema foi modificado para *Graphical Language for Interactive Design* (GLIDE), que se baseou em uma linguagem de

programação capaz de suportar operações geométricas em descrições paramétricas de edifícios. No Reino Unido, o desenvolvimento esteve associado a grandes projetos públicos, investindo na coordenação modular e componentes para edifícios industrializados (KALAY, 2004).

No campo conceitual a grande evolução deste período consistiu na alteração da visão sobre o papel do computador no processo de projeto. Inicialmente visto como um substituto, ele passa para o status de “assistente inteligente”, cuja expectativa envolvia a execução de tarefas mais triviais, liberando o arquiteto para tarefas mais importantes como a tomada de decisão (MITCHELL, 1977).

Esta ideia de parceria e diálogo entre o arquiteto e a “máquina arquitetônica”, é a discussão central o arquiteto Nicholas Negroponte em seu livro *The Architecture Machine* (1970), onde reforça o potencial existente na introdução de métodos científicos e quantificáveis identificados por Alexander:

“A machine, meanwhile, could procreate forms that respond many hereto unmanageable dynamics. such a colleague would not be an omen of professional retirement but rather a tickler of the architect’s imagination, presenting alternatives of form possibly not visualized or not vizualizable by the human designer.”
(NEGROPONTE, 1970 apud KOLAVERIC, 2003).

A partir desta publicação, Oungrinis e Liapi (2014), apresentam uma nova direção para a criação de uma “Máquina de Arquitetura” que evolui da arquitetura responsiva à sistemas de controle de empatia, através da Inteligência Ambiental associada à IA.

A segunda geração de projetos distingue-se pelo advento dos computadores pessoais, cuja proliferação se deu pela redução dos custos das tecnologias agregadas. O significado do CAD, nessa geração, estava mais para o Desenho Assistido por Computador (*Computer Aided Drawing*) do que para o Projeto Assistido por Computador (*Computer Aided Design*), que era mais típico da geração anterior (ANDRADE, 2012). Na verdade, enquanto os sistemas de primeira geração foram introduzidos voltados para o projeto arquitetônico propriamente dito, na segunda geração a ênfase estava no desenho e na modelagem (KALAY, 2004).

Semelhantes aos sistemas CAD da primeira geração, a terceira geração é marcada por retomar sistemas destinados a apoiar o processo de projeto arquitetônico,

e não apenas a representação de edifícios. Contudo, os avanços obtidos em duas décadas de pesquisa proporcionaram sistemas CAD mais inteligentes, aprofundando as pesquisas em áreas como Programação Orientada a Objeto (OOP), IA, sistemas de gerenciamento de banco de dados (DBMS), parametrização; consolidando e desenvolvendo processos de projeto digital (KALAY, 2004).

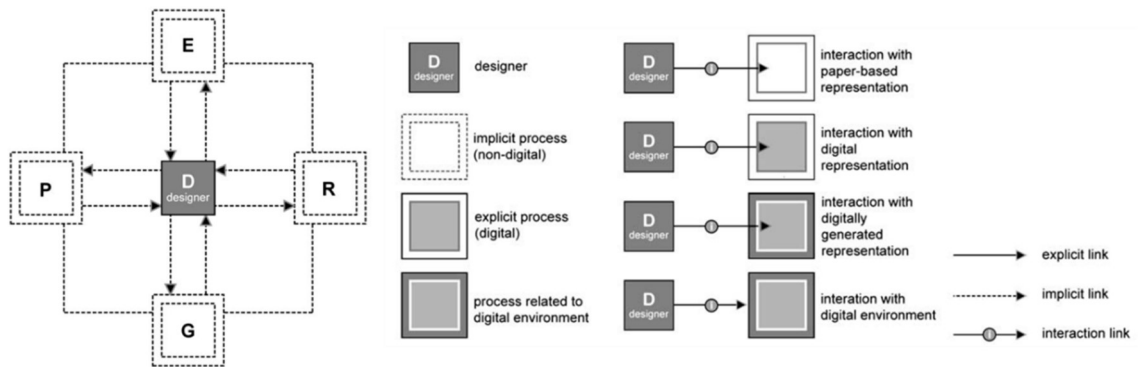
Em paralelo a este processo surge a quarta geração, onde a exploração da forma se dá através do meio digital, implicando em mudanças significativas na metodologia do processo arquitetônico (OXMAN, 2006). Como atenta Kolarevic (2003), nesta nova geração, o arquiteto deixa de modelar formas para articular uma lógica interna de geração da forma. Esta, por sua vez, pode produzir de maneira automática, uma gama de possibilidades formais, dentre as quais, o arquiteto pode escolher a mais apropriada para ser desenvolvida.

Neste contexto, Oxman (2008) apontava a necessidade de distinção entre o conceito de Projeto Assistido por Computador, basicamente baseado em imitar o processo baseado no papel, e de Projeto Arquitetônico Digital, *Digital Architectural Design* (DAD), após a aplicação sistemática dos modelos de processo de projeto digital (OXMAN, 2006) em suas investigações.

Os cinco modelos propostos por Rivka Oxman foram apresentados em seu artigo *Theory and design in the first age* (OXMAN, 2006) com a proposta de serem capazes de situar os novos paradigmas de projeto digital, resultado conquistado após seus esforços em prol da definição do termo: “projeto digital” e da busca por novos paradigmas de projeto, baseando-se na investigação dos conceitos teóricos de arquitetura digital (STEFANI, 2014).

Para a representação do processo de Projeto Arquitetônico Digital, Rivka Oxman propôs um esquema genérico (Figura 44) a partir da elaboração de uma taxonomia, onde identifica os componentes, sua estrutura lógica e morfologia. Utilizando quatro classes de atividades, já consolidadas na metodologia tradicional, representação [R], geração [G] (síntese), avaliação [E] e desempenho [P] (formulação do problema/identificação da situação inicial – relacionados aos aspectos conceituais e pragmáticos: critérios definidos na análise).

Figura 4. Esquema genérico – símbolos, fronteiras e ligações



Fonte: Adaptado de OXMAN, R. Theory and design in the first digital age, in Design Studies, n.27, 2006.p.241-242.

No modelo proposto, o projetista [D] assume centralidade ao considerar sua interação com a representação do problema através da “reflexão-em-ação”, conceito tradicional proposto por Donald Schön (1983). Na estrutura, a identificação do processo cognitivo considera a linha tracejada: implícito, associado a modelos tradicionais de projeto, sem a formalização do processo, envolvendo a intuição e a criatividade; ou com a linha cheia: explícito, cuja aplicação da modelagem digital, introduz maior formalização e explicita a interação com o conhecimento.

As simbologias criadas, na Figura 44, identificam os tipos de ligação e interação do projetista com a mídia em questão. Nela, os quadrados estão associados ao tipo de mídia digital. Quando branco: interação com a representação baseada em papel; cinza com moldura branca: interação com a representação digital (CAD); cinza com moldura cinza escuro: interação com uma representação digital gerada por um mecanismo já previamente definido, quando a seta está posicionada no quadrado interno, indicando que interação será com a representação formal da mídia de projeto. E, interação com ambiente digital, quando a seta está posicionada no quadrado externo, indicando que a interação será com os algoritmos do mecanismo computacional. As linhas com círculos contendo a letra “i” indicam a interação do projetista com a mídia e em questão. Neste trabalho, o estudo de um modelo de projeto digital fundamenta-se nesta estrutura proposta por Oxman (2006).

Através destas representações, Oxman (2006) formulou os cinco modelos de representação para projeto digital: Modelos CAD (*CAD models*), Modelos de Formação

(*Formation models*), Modelos Generativos (*Generative models*), Modelos de Desempenho (*Performance models*) e Modelos Compostos (*Compound models*).

Os Modelos CAD indicam o início do rompimento com desenho sobre papel, porém, com pouco efeito inicial sobre o processo de projeto. Três subgrupos foram identificados: modelo CAD descritivo, modelo CAD descritivo com processo digital bidirecional e modelo CAD para avaliação.

O **Modelo CAD Descritivo** caracteriza-se pelo modelo de CAD tradicional, descritivo, com interação bi e tridimensional e emprego de aplicativos de modelagem/renderização geométrica, ou seja, geram imagens e modelos renderizados, fazendo uso da manipulação de representações gráficas de objetos digitais: desenhos digitais (2D), maquetes eletrônicas (3D) e imagens renderizadas (2D).

O **Modelo CAD descritivo com processo digital bidirecional** semelhante ao modelo anterior, mas com a inversão da tradicional direção da informação: do modelo de dados para o modelo físico. Ou seja, objetos físicos podem ser capturados e traduzidos em modelos digitais e vice-versa (Oxman, 2006), auxiliando na etapa conceitual através da integração entre o virtual e os processos de fabricação e prototipagem.

O **Modelo CAD para avaliação** caracteriza-se por permitir, além dos processos suportados pelo modelo descritivos de CAD, modelos digitais preditivos (estimativas de custo, performance ambiental, comportamentos estruturais, etc.), tornando os processos explícitos e não mais implícitos como em processos de projeto baseados em papel. Qualquer alteração e modificação na representação digital podem ser reavaliadas devido a um banco de dados integrado e estrutura de informação compartilhada (OXMAN, 2006).

Os Modelos de Formação emergem do conceito proveniente da teoria de projeto que transformou o conceito de forma em conceito de composição associado à topologia e a geometria não-Euclidiana, parametrização e animação, introduzindo o conceito de projeto dinâmico com alto nível de interação. Neste caso, Oxman (2006) propôs que o projetista se torne um desenvolvedor de ferramentas digitais. Três subgrupos podem

ser identificados: modelo de formação topológico, modelo de formação associativo e modelo de formação baseado em movimento

O **Modelo de Formação topológico** baseia-se na topologia, estudo relacional dos objetos, e geometria não-Euclidiana, contribuindo para novas explorações formais. Neste caso, as coordenadas estáticas de formas e figuras convencionais são substituídas por constructos da dinâmica computacional, incluindo superfícies topológicas, ou hipersuperfícies; acrescenta-se ainda a criação e manipulação altamente interativa de complexas formas geométricas através de modificadores (*nurbs*, *b-spline* racional não uniforme) e operações de modelagem (*lofting*) (OXMAN, 2006).

O **Modelo de Formação Associativa** é baseado na exploração da geometria associativa da técnica paramétrica, onde as relações dos objetos são explicitamente descritas, estabelecendo a interdependência entre os objetos (OXMAN, 2006). Na ocorrência de variações, mantém-se a relação topológica

No **Modelo de Formação baseada em movimento** a criação da forma está associada às técnicas de movimento tais como animação por quadros, cinemática para frente e inversa, campo de força dinâmica e emissões de partículas. O projetista não interage diretamente com o meio de representação das formas que emergem. A interação do projeto está dentro do enquadramento interativo da mídia de animação que gera a forma (OXMAN, 2006).

No Modelo Generativo as formas são concebidas a partir de fórmulas gerativas pré-definidas (regras gerativas, relações e princípios). Oxman (2006) ressaltou a necessidade de um módulo interativo capaz de fornecer controle e escolhas para o projetista orientar a seleção de soluções desejadas. Dois subgrupos podem ser identificados: Modelo gramaticalmente transformativo e modelos evolutivos (evolucionário);

O **Modelo gramaticalmente transformativo** caracteriza-se pela aplicação da gramática de formas, expressões matemáticas para mecanismos computacionais que direcionam processos de geração de forma através de regras de transformação (OXMAN, 2006).

Nos **Modelos evolutivos** técnicas evolucionárias de geração de forma são baseadas em modelos evolutivos de geração natural (crescimento, mutação e evolução), que podem ser aplicados a processos gerativos de projeto (OXMAN, 2006).

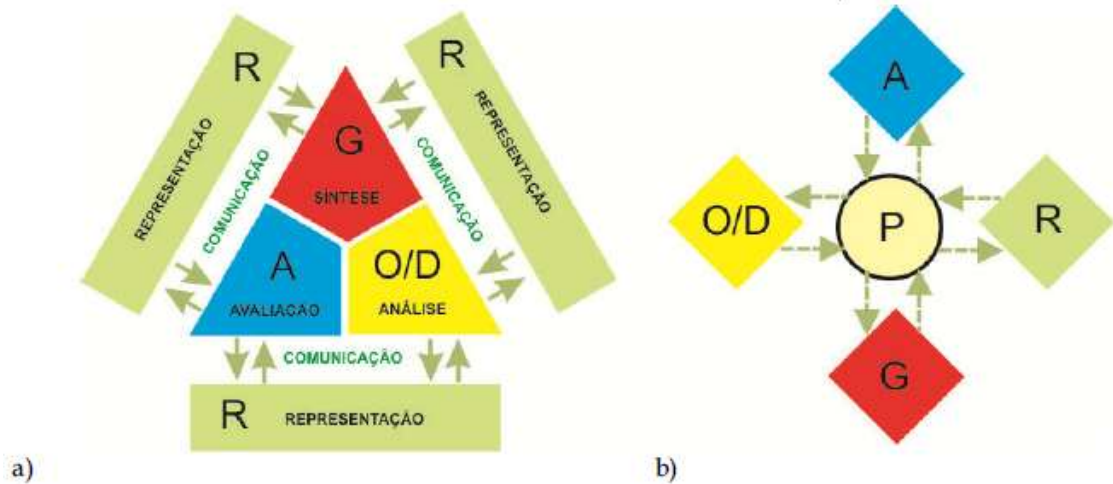
Os Modelos de Desempenho são determinados pelo desempenho, potencialmente integrados com processos de formação e generativos a partir de determinantes externas: premissas ambientais, características do entorno, programa, etc. Dois subgrupos podem ser identificados: modelo de simulação baseado no desempenho e modelo de geração baseada no desempenho;

No **Modelo de simulação baseado no desempenho** simulações digitais de forças externas (ambientais, financeiras, espaciais, sociais, culturais, tecnológicas, entre outras) são aplicadas na condução de um processo de formação, onde técnicas de simulação analíticas produzem detalhas expressões de desempenho (OXMAN, 2006).

O **Modelo de geração baseada no desempenho** é baseado em processos gerativos impulsionados por desempenho para gerar a forma, potencialmente integrados com processos de formação. Projetistas interagem diretamente com três componentes do projeto digital, definindo as forças, interagindo com componentes computacionais que geram a forma e as representam (ANDRADE, 2012) (Modelos Compostos

Oxman (2006) propôs, como objetivo futuro, a integração dos processos: Formação, Geração, Avaliação e Desempenho. Andrade (2012), em sua tese de doutorado, propõe a representação simbólica de sequência de decisão convencional (Figura 5a) seja suplantada por uma representação proposta por Oxman (2006) – Figura 5b. Propondo assim que os modelos acima expostos sejam todos utilizados no processo de projeto atual.

Figura 5. O mapa de sequência de decisão proposto por Andrade (2012)



Fonte: ANDRADE, M. Processo digital de geração da forma baseada no desempenho e com suporte em building information modeling. Campinas: Faculdade de Engenharia Civil – UNICAMP, 2012. 399 p. Tese (Doutorado) – Faculdade de Engenharia Civil, UNICAMP, 2012. p. 276.

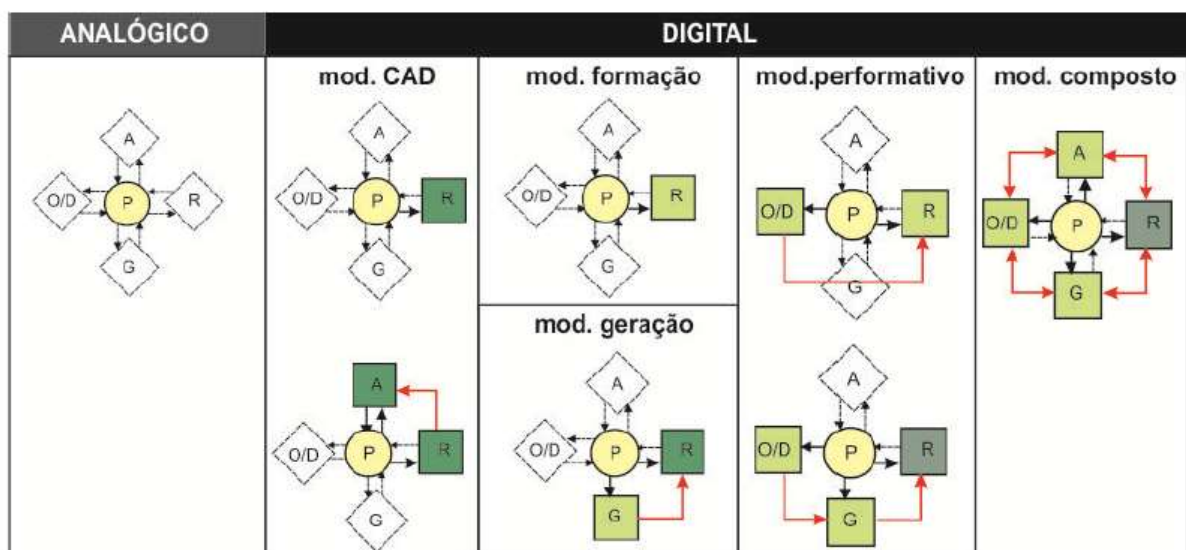
Nessa forma de representação, os componentes do processo de projeto aparecem interagindo diretamente com o projetista, que se transforma no elemento central do Projeto Arquitetônico Digital. Nesse modelo o projetista aparece com a posição simbólica central (P). As fases da sequência de decisão – geração (G), avaliação (A) e representação (R) – constituem-se no modelo de projeto digital nos componentes geração, avaliação e representação do projeto digital (ANDRADE, 2012).

A interação do projetista com os componentes digitais para a realização da síntese arquitetônica demonstrada através dos modelos nos permite identificar como representantes do projeto digital: Modelo CAD descritivo com processo digital bidirecional, Modelos de Formação, Modelos Generativos, Modelos de Desempenho. Excluem-se os outros dois modelos CAD por apontarem apenas a evolução das ferramentas na assistência ao projeto; e, os Modelos compostos por configurarem apenas uma intenção.

Para Oxman os modelos apresentados demonstravam um impacto da concepção à construção no processo de projeto onde o projetista deve assumir um novo papel, atuando como criador de ferramentas de personalização da mídia de projeto, devido à crescente sofisticação da mídia de projeto digital e sua capacidade de funcionar de maneira integrada e interativa.

Desta maneira, compreender o uso de métodos, técnicas e ferramentas à luz de como os projetistas interagem com os componentes do projeto digital é um modo seguro para o entendimento das estruturas de projeto digital (ANDRADE, 2012). Com base nas cinco classes paradigmáticas de modelos de projeto digital apresentadas por Oxman, Andrade (2012) classifica em sete diferentes maneiras de representar os múltiplos processos de projetos digitais. A Figura 6 apresenta o modelo analógico e os sete modelos de projetos digitais.

Figura 6. Classes e subclasses de modelos de projeto digital propostos por Oxman (2006)



Fonte: ANDRADE, M. Processo digital de geração da forma baseada no desempenho e com suporte em building information modeling. Campinas: Faculdade de Engenharia Civil – UNICAMP, 2012. 399 p. Tese (Doutorado) – Faculdade de Engenharia Civil, UNICAMP, 2012. p. 279.

Apesar de todos estes modelos, para Fausoulaki (2008), apenas dois governam as tendências do projeto mediado por computador: o projeto generativo e o performativo.

“In general, two dominant design paradigms govern current digital design efforts in architecture: the Generative Design paradigm and the Performative Design paradigm. Generative design can be broadly defined as an algorithmic or rule-based process through which various potential design solutions can be created.” (FASOULAKI, 2008)

Oxman (2010) apontou nesta mesma direção ao definir a morfogênese digital como a derivação de soluções projetuais através de processos generativos e performativos associados. Neste modelo a forma é o resultado do estudo das estruturas materiais e o seu papel no projeto, envolvendo a arquitetura e a engenharia na etapa de concepção.

2.3.Design Computacional

O *Design* computacional é a forma de operacionalizar os modelos digitais apresentados na seção anterior (2.2). Parte-se do princípio de que a arquitetura não mais é concebida apenas pelo arquiteto, mas sim através de ferramentas computacionais que auxiliam neste processo de concepção.

Apesar deste conceito estar diretamente vinculado à necessidade do computador, os padrões que configuram este processo foram identificados em análises que antecedem a existência deste, como explicitam Godoi (2018) e Neves (2015), já haviam investigações formais resultantes da operação de um ou mais algoritmos. Embora as construções consideradas pelas autoras, Alberti (GODOI, 2018) e Rittel (NEVES, 2015), fossem desenhadas à mão, elas refletiam um modo de pensamento de design computacional. Ou seja, o arquiteto, mesmo sem o auxílio do computador, era responsável por identificar, estabelecer, regras que tornassem possíveis a concepção dos projetos.

Como destaca Neves (2015), o arquiteto tornou-se assim o criador de espaço(s) de possibilidades, identificando o problema, decodificando-o e adaptando-o, e desta forma, o arquiteto passa a dominar as regras e não a forma propriamente dita. O computador apenas contribuiu ampliando a capacidade de processamento de dados e informações, e aumentando o número de derivações destas regras.

Assim, os Sistemas Generativos (SGs) de projeto, nos quais a definição ou o método aplicado na obtenção de uma solução através da inserção de parâmetros é capaz de gerar múltiplas alternativas, pode ser aplicado como um processo exploratório analógico ou completamente automatizado através de recursos digitais. Os conceitos aplicados nos SGs para a arquitetura derivam da matemática e da computação e têm os conhecimentos necessários para a geração de formas em geral associados à teoria da complexidade (SEDREZ; MARTINO, 2018), como por exemplo a Gramática da Forma (gramáticas generativas), os Autômatos celulares (auto-organização) e Fractais (geração e crescimento algorítmico).

Gramática da Forma é considerada um formalismo. Seu desenvolvido remonta ao início da década de 70 por George Stiny e James Gips (1972) para aplicação na

pintura e escultura. Tal gramática, consiste na aplicação de um sistema de geração de formas baseado em regras, e tem suas origens no sistema de produção do matemático Emil Post (1943) e na gramática generativa do linguista Noam Chomsky.

Na arquitetura, a aplicação basicamente consiste na iteração, ou seja, a aplicação sucessiva de regras sobre a forma inicial selecionada, até que se obtenha a composição desejada (CELANI, 2008). Tendo sido explorada, nesta área, ao longo dos anos em diversas aplicações para a resolução de problemas projetuais, por permitir a geração de projetos a partir de uma forma inicial, por meio da aplicação recursiva de regras compositivas (DUARTE, 2007; KNIGHT, 2000; CELANI *et al.*, 2006).

As Gramáticas da forma podem ser classificadas segundo sua utilização, como: gramática da forma analítica, gramática paramétrica, gramática pré-definida (*set grammar*), gramática com marcadores e gramática da cor (CELANI *et al.*, 2006).

Em sua pesquisa, Mayer (2012), aplica a gramática da forma analítica: para a interpretação e caracterização de um conjunto de regras; e, a gramática paramétrica aplicada com recurso computacional capaz de gerar soluções projetuais para o conjunto habitacional social. Cabe aqui ressaltar que adotamos o **tipo** como a representação da forma inicial selecionada.

Adotar-se-á as definições de tipo e modelo apontadas por Argan (2000) em concordância à Quatremère de Quincy (1792), enfatizando a diferença entre tipo, como definição que regularia as condições para um edifício pertencer a uma classe, porém sem determinar a forma final desse edifício e modelo como detentor das características de identidade. Ou seja, tudo é preciso e determinado no modelo; tudo é mais ou menos vago no tipo (CARDOSO, 2008).

Considerando que a Gramática da Forma foi capaz de fornecer relações geométricas entre as partes, Mayer optou por utilizar a teoria dos grafos, berço da Sintaxe Espacial, para descrever os sistemas de relações aplicados em sua pesquisa (MAYER, 2012).

A Sintaxe Espacial, segundo os mais notáveis pesquisadores³ da área Julienne Hanson e Bill Hillier, pode traduzir as maneiras de sociabilidade que os espaços arquitetônicos e urbanos induzem através dos conceitos medidos pelo método.

Essencialmente, um grafo é uma representação gráfica de nós e seguimentos de reta, para indicar as relações entre os elementos, ou seja, em arquitetura os nós representariam os ambientes/espacos e os seguimentos as adjacências. Um grafo tem a característica de, ao ser submetido a certas operações que implicam em mudança de forma, manter as conexões inicialmente estabelecidas, sendo, por excelência, uma representação da topologia entre os elementos em relação (SPERLING, 2008). Contrapondo-se a Alexander (1964), onde os grafos são aplicados para estabelecer relações entre requisitos, parâmetros de projeto, e não entre topologias (ambientes/espacos).

Um **autômato celular** é um tipo de modelagem utilizado para simular ações de interações entre entidades (células, estados e vizinhança), com a finalidade de avaliar seus efeitos sobre um sistema global (ARAÚJO, 2018). Com origem nas ciências naturais, em especial na Biologia, mas difundido principalmente mediante aplicações matemáticas e computacionais, os autômatos celulares apoiam diversos campos como auxílio no entendimento e simulação de sistemas complexos através de regras simples, associando dígitos à uma malha de espacos.

Sua aplicação na arquitetura ainda é recente, mas representa uma ferramenta de apoio a criatividade como um dos SG de projeto de características *bottom-up*, onde as soluções são ascendentes, ou seja, a partir da especificação de elementos singulares é possível obter a concepção global por intermédio de suas conexões. Diferente de soluções *top-down*, que têm direção descendente e consistem da concepção global do objeto, para sua posterior quebra até o nível de elementos singulares (ARAÚJO, 2018).

Percursos dos autômatos celulares na arquitetura Coates *et al.* (1996) introduziram o conceito através de operações geométricas como rotação,

³ Autores dos livros referencias na área de sintaxe espacial: Hillier, The Social Logic of Space (1984 - com J. Hanson) e Space is the Machine (1988), e de Hanson, Decoding Homes and Houses (1998).

espelhamento e extrusão, processos posteriormente denominados de “morfogênese digital” por Tesla *et al.* (2000). A automatização da geração de plantas residenciais, também foi testada através da abordagem dos autômatos celulares (KRAWCZYK, 2001), evoluindo posteriormente para formas de geração tridimensionais combinando processos generativos com intervenções às regras iniciais (HERR; KVAN, 2005-2007; ANZALONE; CLARKE, 2003). Atualmente autores como Karakiewicz, Burry e Kvan (2015) e, Oliveira e Sousa & Celani (2019) também investigam as potencialidades do uso de autômatos celulares em lidar com os problemas urbanos.

A forma concebida na Arquitetura durante muitos anos e ainda hoje, em sua maioria, é proveniente do sistema de geometria euclidiano, responsável por fornecer descrições precisas e exatas dos elementos concebidos pelo ser humano. Sabe-se, no entanto, que na natureza diversos fenômenos fogem deste sistema e encontram na geometria **fractal** uma forma de explicar sua complexidade a partir do processo de iterações.

Enquanto formas euclidianas são usualmente descritas por uma simples fórmula algébrica, fractais, em geral, são o resultado de um procedimento construtivo ou algoritmo que é frequentemente recursivo e idealmente gerado por computador (PEITGEN, *et al.*, 1988).

Certamente as formas euclidianas irão continuar a existir na Arquitetura, mas é inegável que o molde se partiu (JODIDIO, 2005). A primeira aplicação teórica, na arquitetura, foi no projeto “*Moving Arrows, Eros and Other Errors*” (Eisenman, 1988), desenvolvido por Peter Eisenman em 1985, entretanto diversas são as formas de aplicação.

De acordo com Sedrez (2009) é possível agruparmos os modelos de aplicação na arquitetura em três: modelos conceituais, que usam a geometria fractal e seus conceitos como elemento norteador da teoria ou conceito do projeto; modelos geométrico-matemáticos, que usam o esquema de contagem de quadrados para calcular a dimensão fractal ou usam cálculos computacionais para simulação fractal; e modelos geométrico-intuitivos, que usam a geometria como inspiração criativa para formas.

Apesar da geometria fractal ter levado alguns anos para ser assimilada pelos arquitetos, nas últimas décadas sua aplicação em projetos de arquitetura tem sido explorada por muitos pesquisadores, internacionais e nacionais, como Ostwald (2009), Salingaros (2010), Harris (2012) e Sedrez (2016).

2.4. BIM e Aprendizado de Máquina

Penttilä (2006) conceitua BIM como uma metodologia, Succar (2009), acrescenta ser um conjunto de políticas, processos e tecnologias que interagem, produzindo uma metodologia para gerenciar as informações essenciais sobre o edifício, seu desempenho, seu planejamento, sua construção e posterior operação, através de dados do projeto em formato digital, perdurando, assim, por todo o ciclo de vida do edifício.

Eastman *et al.* (2008 p.467) define BIM como:

“a verb or adjective phrase to describe tools, processes and Technologies that are facilitated by digital, machine-readable documentation about a building, its performance, its planning, its construction and later its operation.”

Ou seja, o conceito BIM de acordo com essa definição envolve principalmente processos e tecnologias. BIM tem como meta a busca por uma prática de projeto integrada, em um sentido em que todos os participantes da AECO convirjam seus esforços para a construção de um “modelo único” de edifício (ANDRADE; RUSCHEL, 2009).

Em BIM, o projetista passa a trabalhar com a modelagem orientada a objetos e com relações paramétricas. Ruschel (2014) destaca duas vantagens da modelagem em BIM ser orientada a objetos. A primeira está no fato do modelo ser compostos por objetos inteligentes, com forma, informação e função, incorporando assim regras para manter sua consistência. A segunda vantagem é que ferramentas BIM podem fazer o reuso de modelos. Entretanto, a autora aponta a desvantagem de que cada disciplina de projeto requer um sistema de modelagem BIM.

Projetar com parâmetros impõem o estabelecimento de uma série de regras aplicadas à criação do modelo, uma vez que os elementos geométricos são definidos por suas variáveis mutáveis. Neste caso, o modelo paramétrico atua como um sistema

de informação interligado que tem a capacidade de reagir às alterações específicas que ocorrem em suas partes. Ou seja, durante a geração da forma, a manipulação dos parâmetros incorporados oferece a possibilidade de obter diversos ajustes seguindo a mesma intenção inicial do projeto.

Como constata Rocha (2009), BIM organiza a informação em um ou mais bancos de dados, ou seja, o projetista não desenha diretamente, mas entra com informações de diferentes formas e em diferentes bancos de dados. Neste sentido, o modelo de informação evolui durante o processo de projeto em termos de informação e forma, aprimorando seu nível de desenvolvimento. Tal evolução é classificada em níveis que foram conceituados no documento *E202 – 2008 Building Information Modeling Protocol Exhibit*, pelo *American Institute of Architects* (AIA).

O nível de desenvolvimento (*Level of Development*– LOD) descreve o grau de completude que um elemento do modelo é desenvolvido, explicitando os dados mínimos dimensionais, espaciais, quantitativos e qualitativos que devem estar inclusos num elemento, cuja estrutura foi definida em cinco categorias pelo documento *AIA Draft Document G202-2012*, correspondente ao grau de detalhe de informação confiável presente no elemento: Conceitual (LOD 100), Geometria Aproximada (LOD 200), Geometria Precisa (LOD 300), Fabricação (LOD 400) e *As Built* (LOD 500).

Atualmente, como uma das principais tendências de pesquisa (SANTOS *et al*, 2017), a área de programação em BIM concentra diferentes linhas de exploração que propõem desde a automatização do projeto em sua versão final (MANRIQUE, 2015; SINGH; SAWHNEY; BORRMANN, 2015), à exploração de alternativas de projeto, ainda na etapa de concepção (RAHMANI ASL, M. *et al*, 2015; NEGENDAHL, 2015), somando assim, de diversas maneiras, impactos significativos na forma como os edifícios estão sendo projetados.

A exploração de pesquisas na etapa de concepção advém da necessidade de pensá-la integrada a todas as fases de projeto, possibilitando assim a gestão das informações, geométricas ou não, desde o início do processo, promovendo a integração completa.

Nesta abordagem, Koutamanis (2017) apresenta oportunidades de otimização (*feedforward*) e retroalimentação (*feedback*), que adicionam inteligência aos elementos do modelo e formam um plano de fundo responsivo ao processo de projeto, incorporando o programa de necessidades como parte do modelo. Para o autor, esta necessidade existe pela característica dinâmica inerente ao *briefing* sendo partícipe do ciclo de vida como ilustra a Figura 7.

Figura 7. Briefing em várias etapas do ciclo de vida da edificação



Fonte: Adaptado de Koutamanis (2017,p.121).

Koutamanis (2017) elenca em seu artigo como BIM é capaz de suportar os requisitos do programa de necessidades: (1) permitindo o armazenamento e a recuperação das informações; (2) integrando o programa de necessidades aos agentes do projeto tornando-o acessível e o projeto realmente colaborativo; (3) permitindo o desenvolvimento dinâmico e recursivo das informações do programa de necessidades promovendo continuidade; (4) facilitando a retroalimentação: entre o programa de necessidades e a solução projetual; (5) criando mecanismos de suporte para a otimização, de modo a antecipar os problemas.

No entanto, o autor alerta para a necessidade de atentar à origem das informações, mantendo a característica importante de interação e comunicação estimulada pelo programa de necessidades criando mecanismos em BIM para manutenção da fonte da informação, porém organizando-a de acordo como: metas,

restrições e requisitos. Desta forma, o autor conclui que a maioria das informações de programa de necessidades pode ser integrada em um modelo, com amplas possibilidades de retroalimentação e otimização (KOUTAMANIS, 2017).

Como exposto, a complexidade multidisciplinar do projeto arquitetônico exige um processo colaborativo, cada vez mais transdisciplinar, para que possamos convergir a soluções inovadoras em um projeto realmente integrado, estruturado de forma que a informação possa ser processada e as atividades gerenciadas.

A modelagem de informação nos auxilia neste processo. A integração da informação na indústria requer um processo inteligente e integrativo sobre as várias disciplinas e profissões (KOLAVERIC, 2009). Entretanto, alguns autores indicam uma lacuna que ela ainda não preenche: auxiliar os projetistas na tomada de decisão por uma solução geral satisfatória do projeto em sua fase inicial (HOLZER, 2010; HAYMAKER *et al.*, 2018).

Dentre os pesquisadores que buscam explorar alternativas, ainda na etapa de concepção, destacam-se Holzer (2010) e Haymaker *et al.* (2018) pelos esforços concentrados em propor análises integradas que auxiliem a tomada de decisão.

Holzer (2010) explora como a tecnologia computacional pode suportar processo de seleção de opções (*optioneering*), comumente aplicado na computação, na prática do projeto arquitetônico. Para isto, elabora uma plataforma colaborativa denominada *DesignLink* responsável, não por gerar as simulações de desempenho, mas por apresentar os resultados destas análises de maneira integrada e acessível aos projetistas envolvidos. Apresentar graficamente os dados multi desempenho da edificação, ainda na fase inicial do projeto, possibilitaria ter uma trajetória do processo de projeto com maior probabilidade de sucesso (HOLZER, 2010).

Já Haymaker *et al.* (2018), propõem um fluxo de implementação computacional baseado em quatro camadas: (1) modelagem paramétrica (geração e análise de projeto); (2) análises de desempenho; (3) interface (extração dos dados de entrada e dos resultados); (4) visualização dos dados, padronizados ou normalizados, depois classificados por um função de valor que racionaliza e sintetiza os objetivos e preferências das partes interessadas. Os autores concluem através desse estudo que

gerar e analisar um conjunto maior de alternativas de projeto, explorando diferentes funções de valor, de acordo com as preferências dos interessados, permite que as equipes de projeto melhorem a tomada de decisão, escolhendo parâmetros de entrada que, de outra forma, são muito difíceis de encontrar.

Os conceitos defendidos por Holzer (2010) e Haymaker *et al.* (2018) podem indicar novos caminhos para métodos e processos de projeto de maneira efetivamente integrada, principalmente na etapa de concepção do projeto arquitetônico, desafiando o arquiteto a lidar cada vez mais com o aumento significativo de dados. Este rápido aumento do volume de dados e as crescentes expectativas dos clientes inspiraram muitos pesquisadores a desenvolver novas técnicas computadorizadas para auxiliar e automatizar o processo de projeto e o de construção (KARAN; ASADI, 2019).

No que diz respeito ao processo de concepção do projeto arquitetônico, recentes avanços em IA, englobando o Aprendizado de Máquina (AM), tornaram possíveis novas abordagens através de métodos e algoritmos de tomada de decisão, ou ainda mediante métodos de aprendizagem.

Uma forma de auxiliar os projetistas na tomada de decisão, na concepção de projeto, seria através da classificação de padrões por AM que corresponde a um conjunto de métodos para detectar automaticamente padrões latentes de dados, a fim de prever dados futuros ou realizar tomadas de decisão sob incerteza (RADZISZEWSKI; WACZYŃSKA, 2018). Existem diversas formas para classificar padrões através do AM, entretanto, cada uma está vinculada ao tipo de aprendizado: supervisionado, não supervisionado ou por reforço.

O aprendizado supervisionado é aplicado para problemas bem definidos, e tem como exemplos de classificação a regressão linear, regressão logística, redes neurais artificiais, máquina de suporte vetorial (ou máquinas kernel), árvores de decisão, k-vizinhos mais próximos e *Bayes* ingênuo (HONDA, H. *et al.*, 2017).

Já, o aprendizado não supervisionado é aplicado quando buscamos uma representação mais informativa dos dados que temos, agrupando as informações em pontos mais relevantes para o dado e sua forma representativa. Dentre as técnicas mais conhecidas para resolver problemas de aprendizado não supervisionado estão Redes

Neurais Artificiais, Expectativa-Maximização, Clusterização K-Médias, Máquina de Suporte Vetorial (ou máquinas kernel), Clusterização Hierárquica, *word2vec*, Análise de Componentes Principais, Florestas Isoladoras, Mapas Auto-Organizados, Máquinas de Boltzmann Restritas, *eclat*, *apriori*, *t-SNE* (HONDA, H. *et al*, 2017).

Por fim, no aprendizado por reforço, a máquina tenta aprender qual é a melhor ação a ser tomada, dependendo das circunstâncias na qual essa ação será executada (HONDA, H. *et al*, 2017).

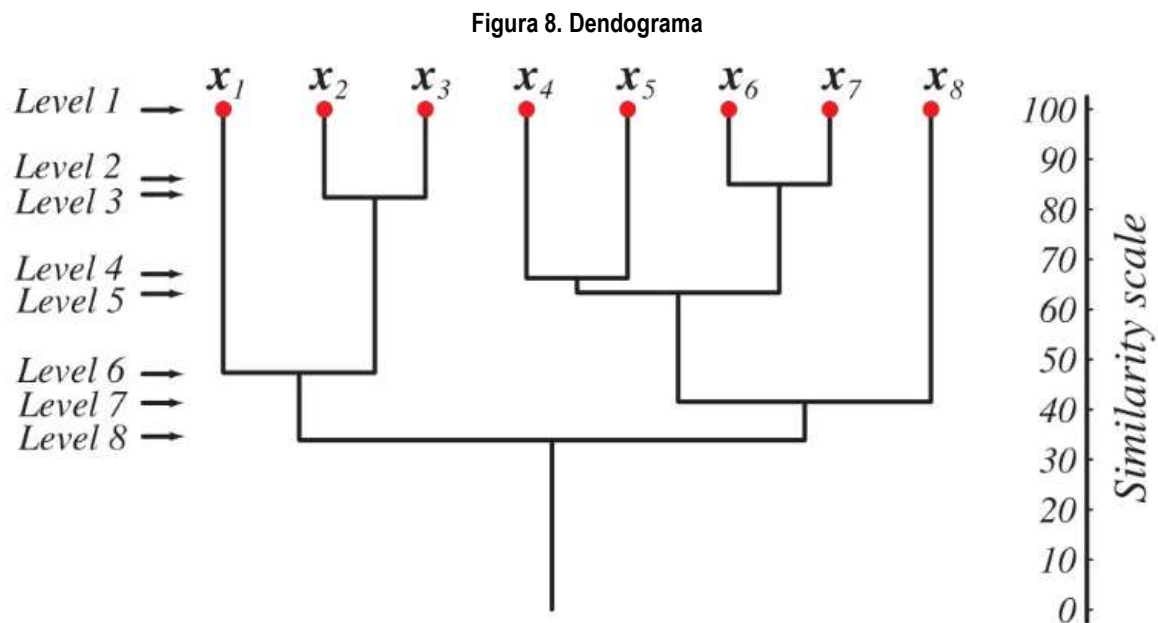
Nesta pesquisa, consideramos a aplicação da Clusterização, por considerarmos nosso problema definido por um aprendizado não supervisionado. A Clusterização é uma classificação não supervisionada de dados em subgrupos (*clusters*) através de um algoritmo que agrupa em conjuntos os dados que ‘possuem certa semelhança’ de alguma forma - independentemente de classes predefinidas.

Um dos algoritmos mais tradicionais, e aplicado nesta pesquisa, se chama **k-means** seu nome expressa exatamente sua função, pois **identifica k clusters distintos** num conjunto de dados. O algoritmo realiza primeiro a associação de cada instancia (dado) ao centro de cada *cluster* (centroide) através da média dos valores neste agrupamento; depois, atualiza a média entre todas as distâncias associadas ao *cluster* correspondente de maneira iterativa até que se estabilize. A qualidade dos *cluster* alcançados pode ser medida por duas análises distintas, a primeira pela caracterização dos agrupamentos, quanto mais distantes entre si, melhores, a outra, pela distância entre as instancias de cada subgrupo, quanto mais próximos, melhor. O funcionamento deste algoritmo assemelha-se à proposta de Alexander em *Notes on the Synthesis of Form* (1964).

Outra forma, também aplicada nesta pesquisa, é a clusterização hierárquica. Diferente do exemplo anterior, que forma agrupamentos desarticulados, o agrupamento hierárquico permeia as atividades das ciências biológicas, onde podemos dividir em ordens, subordens, famílias, subfamílias, até que se determine um organismo individual.

A representação mais natural do agrupamento hierárquico é uma árvore correspondente, chamado de dendograma, que mostra como as amostras são

agrupadas. A leitura dos dados deve considerar através do eixo vertical uma medida generalizada de similaridade entre clusters. Neste caso, no nível 1, todos os oito pontos estão em um mesmo conjunto; cada ponto em um cluster é altamente semelhante a si mesmo, é claro. Os pontos x_6 e x_7 são os mais semelhantes, e são mesclados no nível 2 e assim por diante, conforme ilustrada a Figura 8:

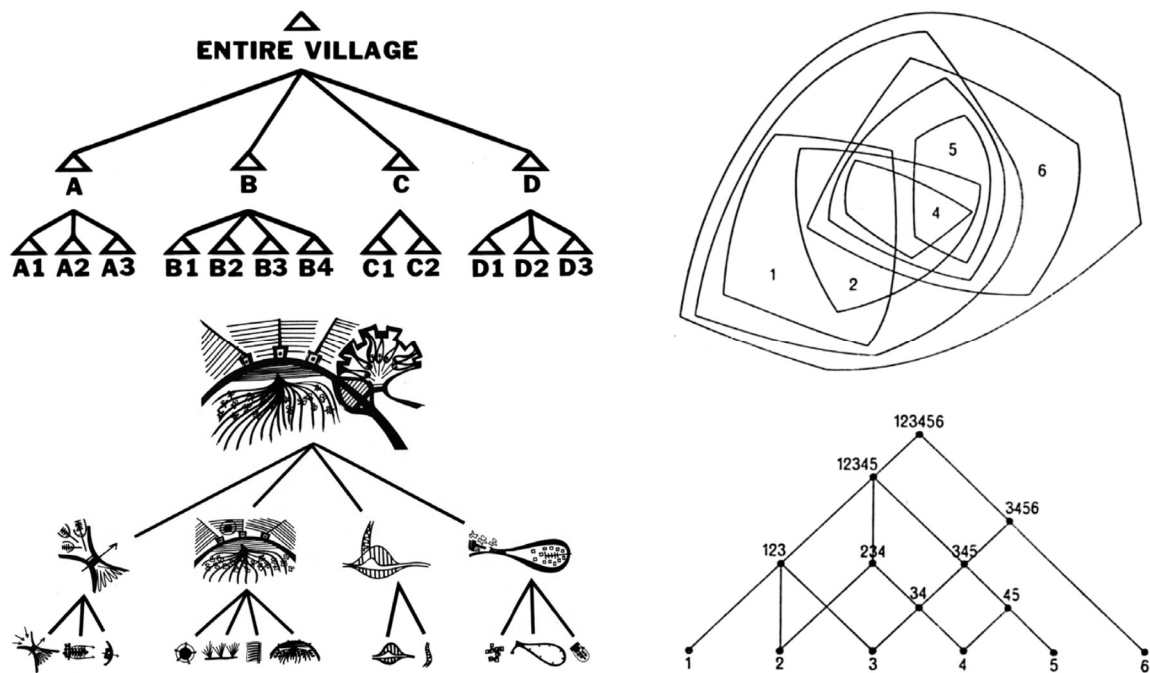


Fonte: Duda; Hart; Stork (2001, p. 640).

O dendograma apresentado anteriormente remete à uma das formas de estruturação de conjuntos apresentadas por Alexander em *City is not a tree* (1966) onde a escolha de subconjuntos por si só dota a coleção de subconjuntos como um todo com uma estrutura geral.

Como ilustra a Figura 9 a estrutura de conjuntos, à esquerda, é organizada em ordem crescente, de modo que sempre que um conjunto contém outro, existe um caminho vertical que leva de um para o outro, enquanto à direita, Alexander apresenta uma semitreliça no qual cada nó filho pode pertencer a mais de um nó pai, indicando interseções nos galhos das árvores e nos conjuntos.

Figura 9. Diagramas de Análise e Síntese da Forma e Semitreliça (Alexander, 1964; 1966)



Fonte: Esquerda: árvores de análise e síntese da forma, In: Alexander, C., Notes on the Synthesis of Form. Cambridge, Harvard University Press, 1964, 151 and 153. Direita: Semitreliça, In: Alexander, C., A City is Not a Tree, Design, 206, 1966.

A revisão de diagramas por Alexander culminou na teoria de *A Pattern Language*, fazendo a transição do genérico conceito do diagrama para o parâmetro de projeto cuja relativa autonomia permite evocar outros sem perturbar sua ocorrência, estabelecendo assim uma rede hierárquica no formato de cascata, apresentado na Figura 3 (Seção 2.1).

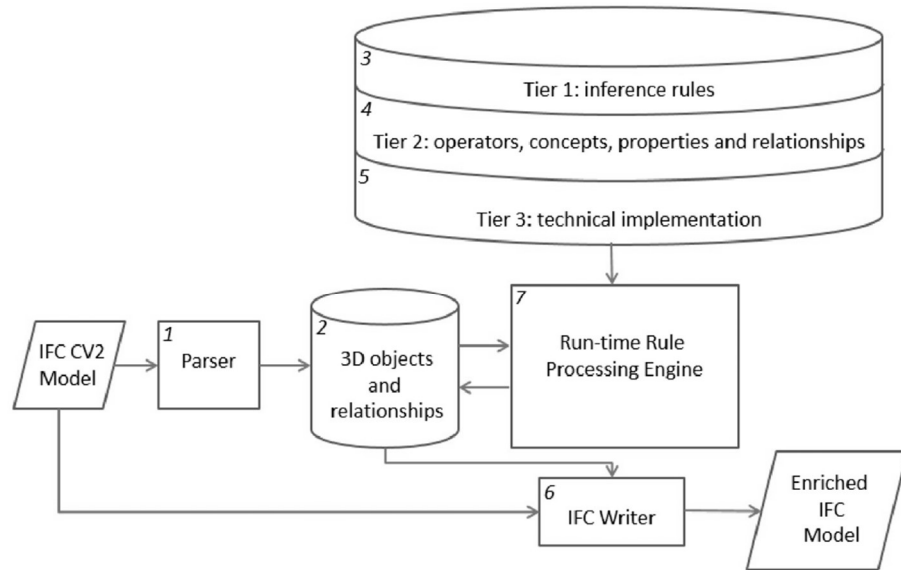
Pesquisas recentes desenvolvem processos para incluir métodos de aprendizado de máquina tanto para o enriquecimento semântico em BIM como para a revisão de modelos (SACKS *et al*, 2019).

Belsky *et al* (2016) propõem um mecanismo de enriquecimento semântico para BIM como uma tentativa de implementar uma abordagem baseada em geometria e topologia para criar arquivos de modelo de construção semanticamente úteis a partir das informações explícitas e implícitas contidas na construção. O enriquecimento semântico para BIM complementa os modelos de construção, em IFC (*Industry Foundation Class*), com as construções semânticas necessárias.

A Figura 10 ilustra o mecanismo de enriquecimento proposto em sete etapas: (1) leitura dos arquivos de instância do modelo IFC exportados das ferramentas BIM; (2) Banco de dados interno; (3) Compilamento das regras de interferência; (4) Geração

arquivos IFC a partir dos modelos semanticamente enriquecidos no banco de dados; (5) Processamento das regras. O processador de regras usa encadeamento direto, para que a derivação de qualquer fato novo sobre um modelo possa desencadear novas inferências. O processamento continua até que nenhum outro fato possa ser inferido (BELSKY *et al*, 2016).

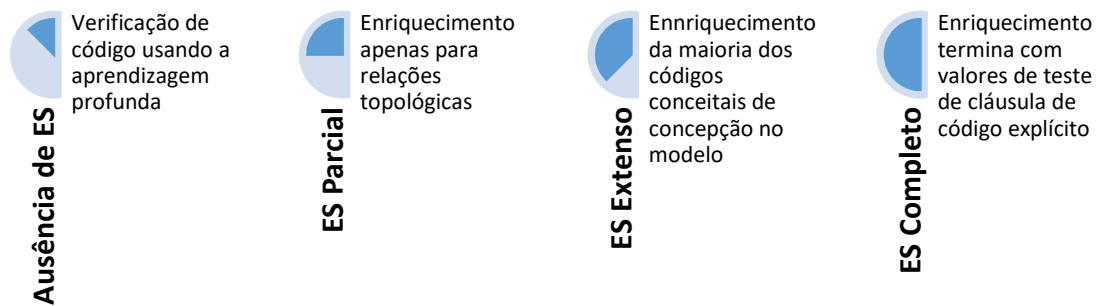
Figura 10. Mecanismo de Enriquecimento Semântico



Fonte: BELSKY, M.; SACKS, R.; BRILAKIS, I. A Semantic Enrichment Engine for Building Information Modelling. **Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering**, p. 261-274..

Para qualquer tarefa, seja no enriquecimento semântico (ES) ou na verificação de código, a escolha de um método de aprendizado de máquina ou baseado em regras dependerá do custo de desenvolvimento, que por sua vez dependerá de questões como o esforço necessário para formular conjuntos de regras, o complexidade da lógica, o grau de interpretação implícita necessário e a disponibilidade de dados para o aprendizado, como ilustra a Figura 11 (SACKS *et al*, 2019).

Figura 11. Espectro de possibilidades para sistemas automatizados de análise de projeto AI BIM



Fonte: Adaptado de SACKS, R. *et al.* Automating Design Review with Artificial Intelligence and BIM: State of the Art and Research Framework. In: **Computing in Civil Engineering** 2019: Visualization, Information Modeling, and Simulation. Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 2019. p. 353-360.

A associação da tecnologia ao ambiente construído tem contribuído de diferentes formas no processo de concepção do projeto arquitetônico, como por exemplo, na síntese (AS, *et al.*, 2018; NISZTUK; MYSZKOWSKI, 2019), na verificação (HU, 2018; SACKS *et al.*, 2019), como gamificação (SAVOV *et al.*, 2016), ou ainda na fabricação (TAMKE *et al.*, 2018).

Especificamente da IA, a associação da tecnologia ao ambiente construído têm evoluído cada vez mais do suporte eficaz para projetos ao monitoramento da execução através de rotulagem de dados (BRAUN; BOORMAN, 2019), e a processos adaptativos, onde a interação com o meio e com os usuários proporciona ambientes construídos responsivos ampliando o processo de projeto ao longo do ciclo de vida da edificação.

São exemplos de soluções responsivas: o projeto de **fachada solar adaptável** que integra técnicas de robótica, aprendizado de máquina, computação onipresente e arquitetura sustentável para avançar em direção à sistemas arquitetônicos com capacidade de aprender com a experiência, ou seja, sistemas arquitetônicos adaptáveis (ROSSI *et al.*, 2012), **ambientes interativos** (WANG *et al.*, 2018) capazes de fornecer respostas ambientais discretas com transições contínuas e suaves em um contexto sensível, através de IA e, mais especificamente, os domínios aprendizado de máquina, para a estimativa de estado e tomada de decisão (OUNGRINIS; LIAPI, 2014); ou ainda como ferramenta para gerar projetos urbanos (MIAO *et al.*, 2018).

3. MÉTODO

O objetivo deste capítulo é apresentar a abordagem metodológica da *Design Science Research* (DSR), método responsável por construir a “Ciência do Projeto”, ou *Design Science* (DS) (SIMON, 1996). Tal metodologia foi adotada para a elaboração desta pesquisa a fim de fundamentar os passos a serem seguidos de acordo com diversos autores (MARCH; SMITH, 1995; LUKKA, 2003; HEVNER; *et al* 2004; VAISHNAVI; KUECHLER, 2005; MANSON, 2006).

Este método foi incluído na lista de Groat e Wang (2013), visto como uma alternativa de tipo de pesquisa sobre o processo de projeto com maior confiabilidade dos resultados. O conhecimento e a compreensão de um domínio do problema e sua solução são alcançados graças à construção e aplicação de um artefato projetado.

3.1.Design Science Research (DSR)

Vaishnavi e Kuechler (2005) consideram a DSR como um método capaz de auxiliar na compreensão dos fenômenos artificiais, criados pelo homem. Em distinção à ciência natural tradicional, de natureza descritiva, que tenta compreender e explicar os fenômenos que ocorrem naturalmente através da descoberta e justificação (SIMON,1996). Desta forma, Simon (1996) revela, justamente, a tarefa das escolas de arquitetura, de ensinar, o que se refere ao artificial, criar e projetar artefatos que tenham as propriedades desejadas e alcancem objetivos definidos.

Segundo Hevner *et al.* (2004), numa abordagem pragmática, a DSR não anseia alcançar verdades últimas, grandes teorias ou leis gerais, mas procura identificar e compreender os problemas do mundo real e propor soluções apropriadas, úteis, fazendo avançar o conhecimento teórico da área. Segundo Simon (1996), uma solução é considerada suficientemente boa quando satisfaz as partes envolvidas no problema, num mundo mais próximo da realidade.

Lukka (2003) elenca as diversas etapas do processo de investigação na DSR: (1) Encontrar problema na prática; (2) Examinar o potencial de investigação junto ao setor alvo; (3) Obter conhecimento geral e profundo do tema; (4) Criar uma solução

inovadora e desenvolver um artefato; (5) Implementar a solução e testar; (6) Refletir sobre a aplicabilidade e (7) Identificar e analisar as contribuições teóricas.

A missão principal da DSR é, portanto, desenvolver conhecimento para a concepção e desenvolvimento de artefatos (VAN AKEN, 2004). Lukka (2003) cita como exemplo de artefatos: modelos, diagramas, planos, estruturas organizacionais, produtos comerciais e projetos de sistemas de informações. No Quadro 1 constam as definições de cada tipo de artefatos:

Quadro 1. Tipos de Artefatos

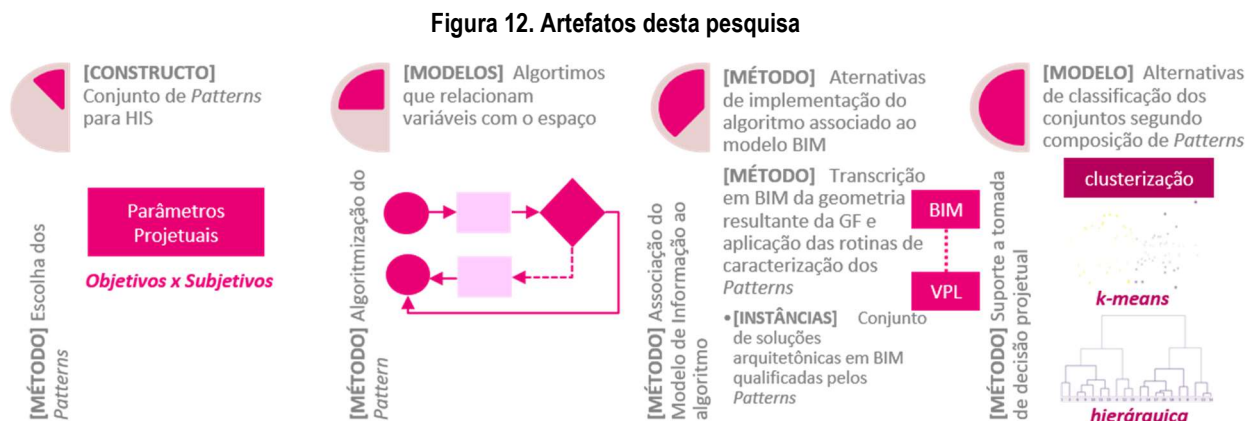
TIPOS DE ARTEFATOS	CONCEITO
Constructos (Conceitos)	Constructos ou conceitos formam o vocabulário de um domínio. Eles constituem uma conceituação utilizada para descrever os problemas dentro do domínio e para especificar as respectivas soluções. Conceituações são extremamente importantes em ambas as ciências, natural e de <i>design</i> . Eles definem os termos usados para descrever e pensar sobre as tarefas. Eles podem ser extremamente valiosos para <i>designers</i> e pesquisadores.
Modelo	Um modelo é um conjunto de proposições ou declarações que expressam as relações entre os constructos. Em atividades de <i>design</i> , modelos representam situações como problema e solução. Ele pode ser visto como uma descrição, ou seja, como uma representação de como as coisas são. Cientistas naturais muitas vezes usam o termo 'modelo' como sinônimo de 'teoria', ou 'modelos' como as teorias ainda incipientes. Na <i>Design Science</i> , no entanto, a preocupação é a utilidade de modelos, não a aderência de sua representação à Verdade. Não obstante, embora tenda a ser impreciso sobre detalhes, um modelo precisa sempre capturar a estrutura da realidade para ser uma representação útil.
Método	É um conjunto de passos, um algoritmo ou guia para desempenhar uma tarefa específica. Esses passos são baseados em um conjunto de construto e um modelo do espaço de soluções. Os métodos podem ser ligados aos modelos, nos quais as etapas do método podem utilizar partes do modelo como uma entrada que os compõem. Além disso, os métodos são, muitas vezes, utilizados para traduzir um modelo ou representação em um curso para resolução de um problema. Os métodos são criações típicas das pesquisas em <i>Design Science</i> .
Instanciação	É a concretização do artefato em seu ambiente. Após a operacionalização dos construtos, modelos e métodos, busca-se mostrar a possibilidade e a efetividade dos modelos e métodos em um ambiente real; no entanto, uma instanciação pode, na prática, preceder a articulação completa de seus constructos, modelos e métodos. Instanciações demonstram a viabilidade e a eficácia dos modelos e métodos que elas contemplam.

Fonte: March e Smith (1995, p. 257-258).

Além dos produtos descritos por March e Smith (1995), Vaishnavi e Kuechler (2007) apresentam um quinto: as contribuições teóricas (*design propositions*). A produção das contribuições teóricas pode ser realizada por meio do método de construção de um artefato, que por si só pode ser objeto de teoria. Ou ainda, por meio das fases de construção e avaliação do artefato, durante as quais as relações entre os elementos do artefato podem ser compreendidas e, assim, complementar, aprimorar ou mesmo refutar uma teoria.

Como a problemática desta pesquisa é gerar um artefato capaz de contribuir positivamente na escolha da solução projetual dentre as derivações apresentadas por sistemas generativos. Utilizou-se para a caracterização dos artefatos a proposta por March e Smith (1995): Constructos, Modelo, Método e Instanciação.

Segundo os critérios apresentados pelos autores e identificados nesta pesquisa no Quadro 1, os artefatos desenvolvidos nesta pesquisa caracterizam-se por quatro métodos que geram: constructos, modelos, métodos e instâncias, conforme ilustra a Figura 12.



Fonte: Autoria Própria.

3.2.Fases da DSR

Perfazendo um dos principais objetivos da DSR, de aproximar a prática da pesquisa acadêmica, o

Quadro 2 descreve o processo de investigação da realidade nas fases adaptado de Lukka (2003), no contexto desta pesquisa.

Quadro 2. Processo de Investigação proposto para esta pesquisa

1. Encontrar o problema na prática	É necessário desenvolver, em BIM, a capacidade de lidar com dados qualitativos para a avaliação das derivações apresentadas por sistemas generativos em HIS.
2. Obter conhecimento geral e profundo do tema	Fundamentação teórica sobre os temas: Arquitetura Digital (Design computacional e BIM), <i>Parâmetros de projeto</i> e processos que auxiliam a tomada de decisão na prática do projeto colaborativo e técnicas da Inteligência Artificial na otimização destes processos.
3. Examinar o potencial de investigação	Examinar as potencialidades de aplicação prática dos referenciais teóricos abordados; verificar como a VPL pode auxiliar no enriquecimento semântico do modelo BIM; identificar como BIM pode auxiliar o projetista a escolher o melhor resultado de um conjunto de inúmeras possibilidades geradas pelo computador.
4. Criar uma solução inovadora e desenvolver um artefato	Criar um método para implementar <i>Parâmetros de projeto</i> em ambiente computacional, utilizando o enriquecimento semântico do modelo BIM através de VPL para tomada de decisão baseada em dados qualitativos.
5. Implementar uma solução e testar	Realizar testes do método de implementação através da avaliação experimental por simulação, tanto para a escolha da implementação, bem como para avaliação dos dados gerados.
6. Refletir sobre a aplicabilidade	Refletir sobre os resultados apresentados na validação do Método, após a análise dos resultados verificados. Avaliação dos processos realizados e verificação se há possibilidade de sua aplicação em contextos semelhantes
7. Identificar e analisar as contribuições teóricas	Verificar se houve avanço no campo teórico, realizar discussão considerando todo o processo (impactos, posicionamentos e mudanças). Analisar qual a contribuição do artefato

Fonte: Autoria Própria.

O infográfico da Figura 13 apresenta as etapas e o delineamento da DSR como metodologia escolhida para esta pesquisa.

Figura 13. Processo de investigação proposto para esta pesquisa



Fonte: Autoria Própria.

3.2.1 Encontrar o problema na prática

Objetivando fazer a caracterização do problema, sua classificação e sua definição, foi realizada uma revisão bibliográfica inicial a respeito da arquitetura digital em duas esferas, a primeira voltada ao *design computacional*, com ênfase na aplicação de sistemas generativos como processo de projeto, e a segunda na aplicação da modelagem de informação no construção nas etapas conceituais do projeto arquitetônico e sua integração ao AM para auxílio a tomada de decisão projetual. Como recorte, adotou-se a aplicação de dados qualitativos às propostas iniciais para viabilizar uma das aplicações da APC (Capítulo 1). Apesar da crescente difusão de BIM no Brasil, sua aplicação continua arraigada às etapas mais avançadas do desenvolvimento projetual.

Cenário que justifica a busca de soluções capazes de desenvolver, em BIM, a capacidade de lidar com dados qualitativos para apoiar os estágios iniciais do projeto através da avaliação de projeto. Nesta pesquisa a ênfase foi dada à capacidade de associar BIM e AM para avaliação de alternativas provenientes de sistemas generativos, através de algoritmos fundamentados nos parâmetros de Alexander *et al.* (1977) para o enriquecimento semântico projetual.

Entretanto, por não ser o foco nem a pretensão desta pesquisa, tampouco selecionar, avaliar, ajustar ou propor novos parâmetros como sugere Alexander *et al.* (1977) na aplicação da sua metodologia, parte-se de uma seleção de parâmetros de projeto para o enriquecimento semântico projetual, dentre os diversos originalmente identificados por Alexander e seus colaboradores, realizada por Raquel Barros em sua tese de doutorado (BARROS, 2008), capaz de oferecer uma contribuição para a reflexão e prática do processo projetual, valorizando a relação entre conceitos humanizadores e a qualidade espacial do projeto da habitação coletiva.

A análise da bibliografia a respeito da classificação de padrões, revelou a possibilidade de se obter agilidade significativa no processamento de dados através da geração automática de conjuntos classificadores que represente a melhor clusterização, ou seja, o melhor agrupamento de dados (*clusters*).

3.2.2 Obter conhecimento geral e profundo sobre o tema

Essa fase é refletida na fundamentação teórica, realizada através da revisão de livros, artigos científicos, sites, teses e periódicos, com a finalidade de acumular o conhecimento sobre o estado da arte do problema. Tratou-se dos temas correlatos ao trabalho: arquitetura digital, *design* computacional, parâmetros de projeto, BIM, enriquecimento semântico associado a propriedades em modelos BIM, programação visual, classificação de padrões e AM. Todos estes temas são essenciais para o desenvolvimento desta pesquisa.

3.2.3 Examinar o potencial de investigação

A fundamentação teórica permitiu examinar o potencial de investigação, além de gerar conhecimento geral e concatenado sobre o tema. De maneira simplificada, os sistemas generativos são aplicados como métodos baseados em algoritmos ou regras, que permitem a criação de diversas alternativas projetuais. Destas inúmeras possibilidades, apenas uma deve ser escolhida. Se por um lado, a modelagem da informação possibilita ampliar o espectro dos dados, da geometria à informação, aumentando significativamente o número de derivações, por outro, ela pode auxiliar na tomada de decisão quando relacionada ao reconhecimento de padrões, através de seleções de características supervisionadas ou não.

Como recorte para o levantamento de características qualitativas, verifica-se ao longo da revisão bibliográfica a potencialidade na aplicação de parâmetros da "*Pattern Language*", amparando a construção de algoritmos capazes de auxiliar a tomada de decisão, em projetos de HIS, fomentando a possibilidade de incorporação do conhecimento da relação ser humano – ambiente à modelagem da informação através da aplicação da VPL, ESBIM e AM.

No processo proposto acima, o projetista assume papel fundamental, como elemento central do Projeto Arquitetônico, onde todos os componentes do processo de projeto (geração, avaliação, desempenho e representação) passam a interagir diretamente com o projetista, configurando assim o Modelo Composto proposto por Andrade (2012).

Como um dos principais desafios de aplicação da VLP, Morais *et al.* (2014) destacam a necessidade de conhecimento de noções básicas de programação, que permite criar as regras condicionais com VBA, evidenciando a importância da introdução desses conceitos e práticas na grade curricular da formação profissional de arquitetos e urbanistas, conteúdo ainda pouco incorporado pelas universidades. Neste sentido, esta pesquisa busca contribuir também nesta área.

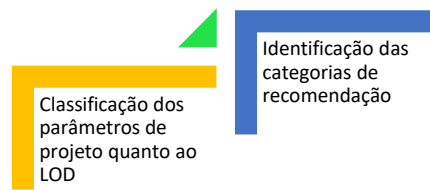
De acordo com Morais *et al.* (2014), a grande demanda de moradias no Brasil tem sido respondida por meio de programas sociais, que entregam unidades habitacionais concebidas sob um mesmo padrão, expresso na forma de grandes conjuntos habitacionais, altamente adensados, distantes das centralidades que podem dar suporte aos seus moradores, num padrão constante de monotonia, repetição e precariedade. Acrescidos dos recorrentes problemas de projeto como layouts, coberturas, confortos ambientais, entre outros.

3.2.4 Criar uma solução inovadora e desenvolver um artefato

A **primeira etapa da solução** envolve um **método** para a seleção de parâmetros de projeto aplicáveis à construção de algoritmos para o enriquecimento semântico projetual. Os parâmetros de projeto relacionados ao tema habitacional foram selecionados preliminarmente dentre os 253 descritos e pertencentes a quaisquer das três seções de Alexander *et al.* (1977). No decorrer da pesquisa, durante a avaliação dos projetos, a seleção inicial foi sendo lapidada, com o acréscimo ou eliminação de alguns parâmetros de projeto, buscando-se extrair destes o conteúdo relevante para aquela avaliação quanto ao melhor atendimento de necessidades psicossociais e ambientais (BARROS, 2008).

Este método proposto (Fig. 14) é um conjunto de passos para identificar parâmetros de projeto que possam ser transformados em algoritmos para o enriquecimento semântico projetual. Sua aplicação resulta em um **constructo** que abrange o conjunto de Parâmetros de projeto para HIS.

Figura 14. Escolha dos Parâmetros de projeto

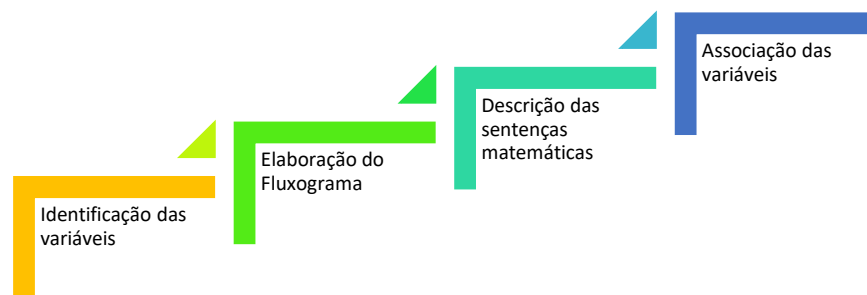


Fonte: Autoria Própria.

Os passos consistem em: (01) Classificação dos parâmetros de projeto quanto ao LOD, dentro das escalas de aplicação: Senso de Urbanidade e Senso de Habitabilidade; (02) Identificação das categorias com potencial de automatização: (i) explícita (objetivo) ou implícita (subjetivo), (ii) geométrica ou informacional (SOLIHIN; EASTMAN, 2015).

A **segunda etapa da solução** envolve um **método** para algoritmização dos parâmetros de projeto selecionados anteriormente. Esse método (Fig. 15) é um conjunto de passos para descrever graficamente e matematicamente os algoritmos que permeiam os parâmetros de projeto e associá-los ao BIM.

Figura 15. Algoritmização dos Parâmetros de projeto

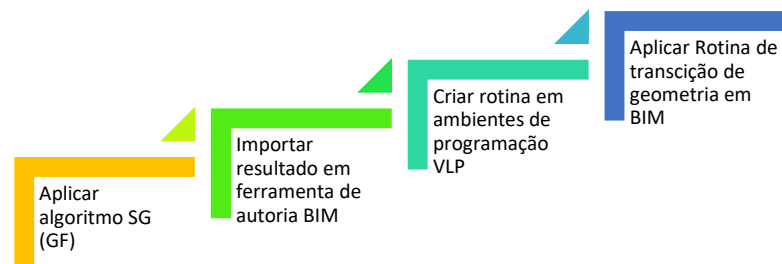


Fonte: Autoria Própria.

Os passos deste método, consistem em: (01) Identificação das frases/parágrafos que contém as variáveis (GODOI, 2018); (02) Elaboração do fluxograma de cada algoritmo, explicando graficamente o conjunto de passos planejados para que se alcance o propósito do parâmetro de projeto; (03) Descrição das sentenças matemáticas explicitadas por Bianconi (2002), por fim a apresentamos a associação dos algoritmos aos espaços considerando BIM, adaptando o modelo sugerido por Chen *et al.* (2011), como é explicado no capítulo 4.

A **terceira etapa da solução** envolve um **método** para a associação do Modelo de Informação ao algoritmo criado. Este método desdobra-se em dois outros, o **primeiro** (Fig. 16), para transcrever em BIM as geometrias resultantes dos SGs, neste caso da Gramática da Forma (GF).

Figura 16. Transcrição em BIM da geometria resultante da GF



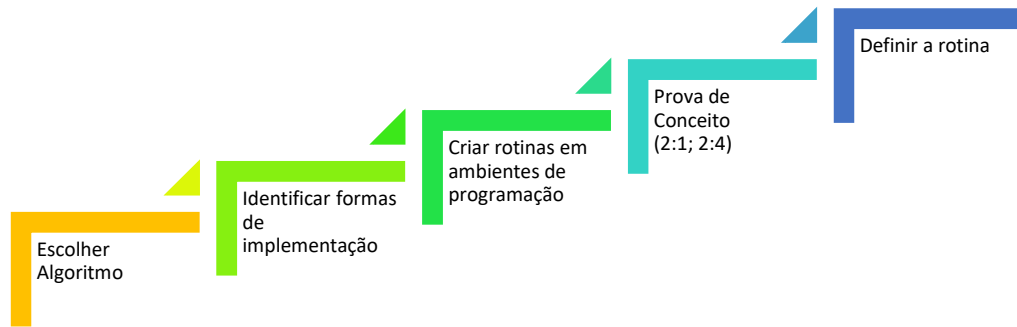
Fonte: Autoria Própria.

Os passos, do primeiro método, consistem em: (01) Aplicar algoritmo de geração da forma através de SGs, nesta pesquisa utilizamos a programação apresentada na pesquisa de Mayer (2012), do *Grasshopper*; (2) Importar o resultado (plantas) para uma ferramenta de autoria BIM; (3) Criar rotina em VLP; (4) Aplicação da rotina.

A investigação desta pesquisa contou com o uso combinado da ferramenta de autoria de modelos Autodesk Revit e da ferramenta VLP Dynamo, para a (i) criação de paredes considerando as linhas originais como eixo, (ii) pisos entre paredes e (iii) criação de *rooms* para identificação dos parâmetros atribuídos

O **segundo método**, da terceira etapa, propõem alternativas para implementação dos parâmetros de projeto (Figura 17), através do uso combinado de ferramentas de autoria de modelos e ferramentas VLP. Percebe-se nesta pesquisa a influência da modelagem BIM na escolha de implementação de um indicador de projeto, uma vez que para cada indicador apresenta mais de uma forma de implementação, tornando-se necessário definir o algoritmo mais apropriado.

Figura 17. Algoritmização de parâmetros de projeto por meio de programação visual em BIM

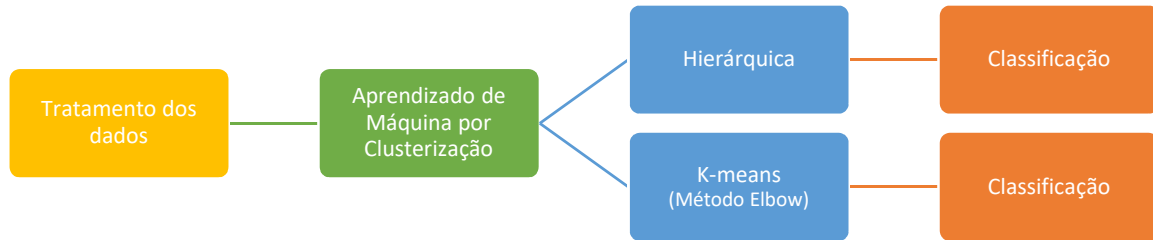


Fonte: Autoria Própria.

Os passos, deste método, consistem em: (01) Escolher um algoritmo, dentro da escala de agrupamento, apresentada a seguir: Urbanidade-Independente (U-I), Unidade Habitacional-Posição (UH-P), Unidade Habitacional-Organização (UH-O) e Unidade Habitacional-Independente (UH-I); (02) Identificação das formas de implementação; (03) Criar as rotinas em ambientes de programação; (04) Realizar a prova de conceito, considerando inicialmente a implementação de duas rotinas distintas em uma mesma solução (2:1) e posteriormente das duas rotinas em quatro soluções distintas (2:4), para avaliar qual delas será implementada; (05) Definição da rotina, adaptando o modelo sugerido por SEGHIER *et al* (2017).

A **quarta etapa da solução** proposta, apresentado pela Figura 18, é um **método** de suporte a tomada de decisão projetual, qualificada através dos parâmetros de projeto, dentre as inúmeras derivações apresentadas por sistemas generativos como possíveis soluções ao problema projetual. O método proposto incorpora a geração automática de conjuntos classificadores por meio da seleção de características não supervisionada, cujo objetivo fundamenta-se na identificação de subconjunto de características que represente a melhor clusterização, ou seja, o melhor agrupamento de dados (*clusters*), reduzindo o espectro das soluções categorizando-as de acordo com características que maximizam os critérios de desempenho qualitativo dos parâmetros de projeto.

Figura 18. Classificação da informação da aplicação dos parâmetros de projeto



Fonte: Autoria Própria.

Os passos, deste método, consistem em: (01) Tratamento dos dados, redução por média, normalização logarítmica ou algorítmica, se necessário, como propõem Haymaker *et al.* (2018); (02) Aprendizado de Máquina por Clusterização; (03a) Clusterização, método tradicional de agrupamento, o *K-Means* que implica na aplicação do Método *Elbow*, para definir o número de agrupamentos; e/ou (03b) Clusterização Hierárquica; (04) Decisão projetual, etapa inerente de análise e escolha do projetista frente a avaliação realizada nos universo apresentado pelas classificações, através da aplicação dos parâmetros de projeto.

Dessa forma, a solução inovadora desta pesquisa é a operacionalização das quatro etapas, de maneira integrada, para a avaliação das derivações apresentadas por sistemas generativos, em CAD ou BIM, fomentando a possibilidade de incorporação de parâmetros de projeto em ambiente computacional.

O desenvolvimento destes artefatos contribui para a aproximação dos dois ramos da arquitetura digital: o design computacional e a modelagem da informação da construção.

O capítulo 5 apresenta o detalhamento dos artefatos criados e seu processo de desenvolvimento.

3.2.5 Implementar uma solução e testar

Considerando o desenvolvimento e a avaliação do artefato essencial para o processo da DSR (TREMBLAY; HEVNER; BERNT, 2010). Hevner, *et al* (2004) propõem alguns métodos que podem ser utilizados para a avaliação dos artefatos gerados pela DSR, são eles (Quadro 3):

Quadro 3. Métodos para avaliação dos artefatos

FORMA DE AVALIAÇÃO	MÉTODOS PROPOSTOS
Observacional	Estudo de Caso: Estudar o artefato existente, ou não, em profundidade no ambiente de negócios. Estudo de Campo: Monitorar o uso do artefato em projetos múltiplos. Esses estudos podem, inclusive, fornecer uma avaliação mais ampla do funcionamento dos artefatos configurando, dessa forma, um método misto de condução da pesquisa.
Analítico	Análise Estatística: Examinar a estrutura do artefato para qualidades estáticas. Análise da Arquitetura: Estudar o encaixe do artefato na arquitetura técnica do sistema técnico geral. Otimização: Demonstrar as propriedades ótimas inerentes ao artefato ou então demonstrar os limites de otimização no comportamento do artefato. Análise Dinâmica: Estudar o artefato durante o uso para avaliar suas qualidades dinâmicas (por exemplo, desempenho).
Experimental	Experimento Controlado: Estudar o artefato em um ambiente controlado para verificar suas qualidades (por exemplo, usabilidade). Simulação: Executar o artefato com dados artificiais.
Teste	Teste Funcional (Black Box): Executar as interfaces do artefato para descobrir possíveis falhas e identificar defeitos. Teste Estrutural (White Box): Realizar testes de cobertura de algumas métricas para implementação do artefato (por exemplo, caminhos para a execução).
Descritivo	Argumento informado: Utilizar a informação das bases de conhecimento (por exemplo, das pesquisas relevantes) para construir um argumento convincente a respeito da utilidade do artefato. Cenários: Construir cenários detalhados em torno do artefato, para demonstrar sua utilidade.

Fonte: Hevner, March e Park (2004, p. 86). Adaptado por Lacerda *et al.* (2013).

Em três momentos da implementação foram aplicadas formas de avaliação distintas como descritas no Quadro 3: (i) na Escolha dos Parâmetros de projeto para o enriquecimento semântico projetual. (Figura 14) adota-se a avaliação analítica da categorização de Solihin e Eastman (2015) para a identificação dos parâmetros de projeto automatizáveis; (ii) na Algoritmização de Parâmetros de projeto em BIM (Figura 17) adotou-se a experimentação por meio da simulação e comparação na prova de conceito para definição da rotina de automatização e por fim (iii) na Classificação da informação da aplicação dos parâmetros de projeto (Figura 18) adotou-se a avaliação descritiva por meio de cenários. Assim, a implementação é avaliada para verificar a capacidade de suporte para tomada de decisão, se sua aplicação facilita ou engessa o processo, e ainda se é capaz de agregar o conhecimento tácito às soluções projetuais.

A implementação contou o uso combinado de diversas tecnologias: a ferramenta de modelagem BIM Autodesk Revit e das ferramentas VLP Dynamo e

Grasshopper, em Rhinoceros, do editor de planilha Microsoft Office Excel para consolidação do banco de dados. Da plataforma de hospedagem do código-fonte GitHub e do Colab, onde os testes foram realizados através dos algoritmos para classificação: *k-means* e *hierárquica* (RADZISZEWSKI; WACZYŃSKA, 2018; HONDA, H. *et al*, 2017).

3.2.6 Refletir sobre a aplicabilidade

Na fase de aplicabilidade é necessário o processo de reflexão e aplicabilidade dentre os quatro possíveis produtos identificados por March e Smith (1995), a saber, constructos, modelos, métodos e instanciamentos, torna-se importante a avaliação dos métodos propostos como diretrizes para desempenhar uma tarefa específica, e da proposta de instanciamento, realização dos artefatos em seu ambiente.

March e Smith (1995) elencam alguns pontos que devem ser considerados ao se avaliar os **métodos** e o **instanciamento**. De acordo com os autores, os métodos devem ser avaliados considerando-se a operacionalidade (a capacidade de executar a tarefa pretendida ou a capacidade dos seres humanos para utilizarem de forma eficaz o método), a eficiência, a generalidade, e a facilidade de uso. Já a avaliação da instanciação deve considerar a eficiência e a eficácia do artefato, seu impacto sobre o ambiente e seus usuários (MARCH; SMITH, 1995). Neste caso, verificar-se-á a capacidade de suporte para tomada de decisão, se sua aplicação facilita ou engessa o processo, e ainda se é capaz de agregar o conhecimento tácito às soluções projetuais.

3.2.7 Identificar e analisar as contribuições teóricas

Duas análises são propostas para esta etapa. A primeira deve relatar a contribuição teórica do estudo, e qual a evolução do processo de projeto proposto em relação aos modelos teóricos de referência. A segunda, analisar o potencial de desenvolvimento aplicado com as instanciações realizadas. Elencam-se pelo menos cinco questões devem ser esclarecidas nesta etapa:

- Houve de fato contribuição teórica? Quais foram?

- Analisando-se o contexto da pesquisa, os artefatos de fato funcionam ou não, para o contexto proposto? Se sim, é possível realizarem-se generalizações para sua aplicação?
- O processo de projeto criado na pesquisa contribui para modificar os processos de concepção atuais?
- É possível verificar melhorias na qualidade projetual?
- Os artefatos têm potencialidade para gerar novas pesquisas correlatas à área de estudo?

4. POTENCIAL DE INVESTIGAÇÃO

A finalidade deste capítulo é verificar como a modelagem da informação pode auxiliar a tomada de decisão, dentre de um conjunto de inúmeras possibilidades geradas pelo computador para projetos HIS, através da operacionalização da aplicação de parâmetros de projeto para o enriquecimento semântico associado a propriedades em modelos BIM e análise dos resultados através da classificação de padrões por aprendizado de máquina

A partir da bibliografia estudada, apresentam-se os modelos teóricos que contribuem para o desenvolvimento dos artefatos desta pesquisa. Foram utilizados o modelo sugerido por Godoi (2018), para a definição de variáveis que compõem cada algoritmo; o modelo proposto por Chen *et al.* (2011), que incorpora a associação dos objetos à BIM; o modelo desenvolvido por Seghier *et al.* (2017), para extração automática dos dados do modelo BIM a serem analisados pelo projetista ainda na etapa de concepção; o modelo para clusterização não supervisionada, através do *k-means*, aplicando o método de Elbow para a otimização do número de *clusters* apresentado por Raschka e Mirjalili (2017).

4.1.A gramática da forma para análise e geração de formas no projeto de HIS

A baixa qualidade dos projetos de HIS no Brasil é frequentemente relacionada a uma metodologia desestruturada onde aspectos importantes do projeto, como as necessidades do cliente e a relação ser humano-ambiente, são negligenciados em função de outros, como por exemplo, o custo, prazo entre outros.

Ademais, constata-se o pouco uso da tecnologia de informação, de ferramentas automatizadas para análise de projetos, e até mesmo a aplicação de pesquisas capazes de subsidiar a solução de problemas, de monotonia e repetição geradas pela precariedade das soluções, retroalimentando o processo de projeto MORAIS *et al.*, 2014).

O cenário exposto faz emergir a necessidade de rediscutir aspectos levantados por movimentos como o *Design Methods* (1960) e o *Design Thinking* (1969), devido não somente à repercussão que tiveram, mas principalmente às importantes contribuições como da avaliação pós-ocupação, do programa arquitetônico, da inteligência artificial e da aplicação de técnicas computacionais para solucionar os problemas de projeto, e compor as formas dos objetos (MOREIRA, 2007).

É comum observarmos a criação de algoritmos relacionados ao desempenho quantitativo, acústico, térmico, luminoso (GONÇALVES, 2018), mas não ao qualitativo (ser humano-ambiente), capazes de auxiliar o projetista na decisão.

Morais *et al.* (2014) sugerem em seu artigo que futuramente o algoritmo possa ser acrescido de maior número de elementos, relações e regras, que resultem na melhoria da qualidade ambiental, variabilidade espacial e valor percebido pelo usuário desse Conjunto Habitacional, possibilitando explorar parâmetros quantitativos e qualitativos passíveis e aplicáveis também ao contexto do habitar urbano. O experimento realizado pelos autores almeja dar suporte para futuros estudos de inserção de qualidade urbana em conjuntos habitacionais similares, indicando sua continuidade e aprimoramento, principalmente no que tange aos testes de interoperabilidade com outras plataformas, ampliando a gama de possibilidades a serem geradas (MORAIS *et al.*, 2014).

No intuito de reduzir a subjetividade que envolve diversas das questões projetuais e explorar novas soluções, Carlos Vaz (VAZ, 2009), em sua dissertação de mestrado, trabalha com a elaboração de uma gramática da forma com o foco voltado para um dos sistemas aplicados por Burle Marx, o conjunto de ilhas dos espelhos d'água presentes nos jardins do Ministério de relações exteriores (Palácio do Itamaraty), pela sua complexidade formal e o baixo número de variáveis. De acordo com o autor, trata-se de um sistema de grande simplicidade diagramática, que resulta, porém, em uma grande variedade formal (VAZ, 2009). Neste sentido, a preocupação com a escolha dos sistemas a serem trabalhados deve considerar sua potencialidade na busca de soluções.

Ainda segundo Vaz (2009), para a obtenção de resultados na implantação de parâmetros e condicionantes de projeto por meio da gramática da forma deve-se desenvolver um processo contínuo que inclui seu teste, com a finalidade de reduzir o universo de instâncias que são coesas ao conjunto de composições analisadas. Desta forma, o vocabulário e as regras da gramática é apenas o início de um longo processo que deve incluir testes sucessivos.

Neste sentido pretende-se, através desta pesquisa, criar um método para que o enriquecimento semântico de modelos BIM atue como um catalizador da abordagem de conceitos humanizadores na escolha de soluções projetuais proveniente de sistemas generativos.

4.2. Parâmetros de projeto em habitações coletivas

Alexander (1979) proporciona a teoria e as instruções para o uso da linguagem, sua origem e prática, e ainda apresenta a obra de Alexander *et al.* (1977) como uma das possíveis linguagens de parâmetros almejadas. Contudo, far-se-ia necessário contextualizá-la à realidade temporal e social brasileira. Como destaca Alexander *et al.* (1977), é premissa que o projetista seja alimentado por circunstâncias locais específicas, e argumenta que a relação entre os parâmetros projetuais não é linear, visto que há uma riqueza de conexões entre diferentes níveis.

Entretanto, este não é o foco nem a pretensão desta pesquisa, tampouco selecionar, avaliar, ajustar ou propor novos parâmetros como sugere Alexander *et al.* (1977) na aplicação da sua metodologia. Neste sentido, Salingaros (2000) adverte para o perigo em se considerar a obra Alexander *et al.* (1977) como apenas um catálogo de parâmetros: uma coleção frouxa de parâmetros não é um sistema já que não apresenta conexões.

Desta forma, contextualiza-se para esta pesquisa referenciar o trabalho de Barros (2008). Partindo de uma seleção de parâmetros de projeto para o enriquecimento semântico projetual, dentre os diversos originalmente identificados por Alexander e seus colaboradores, Raquel Barros, em sua tese de doutorado, oferece uma contribuição para a reflexão e prática do processo projetual valorizando a relação

entre conceitos humanizadores e a qualidade espacial do projeto da habitação coletiva. Na construção metodológica de sua pesquisa, a autora busca identificar os parâmetros projetuais, relacionados à escala da implantação e à escala da habitação, a partir de um levantamento de projetos realizado em periódicos nacionais, impressos ou eletrônicos, entre os anos de 1980 e 2005 de todas as premiações da habitação coletiva paulista.

De acordo com Barros (2008), os parâmetros de projeto relacionados ao tema habitacional foram selecionados preliminarmente dentre os 253 descritos e pertencentes a quaisquer das três seções de Alexander *et al.* (1977). No decorrer da pesquisa, durante a avaliação dos projetos, a seleção inicial foi sendo lapidada, com o acréscimo ou eliminação de alguns parâmetros de projeto, buscando-se extrair destes o conteúdo relevante para aquela avaliação quanto ao melhor atendimento de necessidades psicossociais e ambientais (BARROS, 2008).

Por fim, Barros (2008) estabelece uma estratégia projetual composta por um conjunto de quatro categorias de parâmetros de projeto a saber: (1) Parâmetros de projeto originais identificados nos projetos, (2) Novos *Parâmetros de projeto* identificados nos projetos, (3) Parâmetros de projeto originais incorporados aos novos parâmetros (4) Parâmetros de projeto originais acrescentados à estratégia. A nova coletânea de parâmetros (74) foi organizada e apresentada em duas escalas que compõem a proposta de estratégia metodológica de apoio ao processo projetual: Senso de Urbanidade (37) e Senso de Habitalibidade (45). A nova coletânea de parâmetros foi organizada e apresentada em duas escalas que compõem a proposta de estratégia metodológica de apoio ao processo projetual: Senso de Urbanidade (Quadro 4) e Senso de Habitalibidade (Quadro 5).

Quadro 4. Estratégia projetual para o senso de urbanidade

PROPRIEDADES ESPACIAIS		SENSIBILIDADE AO AMBIENTE CONSTRUÍDO ENATURAL EXISTENTE	CONECTIVIDADE, LEGIBILIDADE E SUSTENTABILIDADE SOCIAL	IDENTIDADE
	1	Edificação melhorando o terreno Espaço externo positivo Orientação solar para espaço externo Unidades ao redor de pátio Unidades em fita Unidades em terraços escalonados	Espaço externo positivo. Recuo frontal nulo. Formato de caminhos. Estacionamentos pequenos. Praças pequenas. Bolsões de atividades	Layout da cobertura Vegetação conformando ambientes
	2	Caminhos e lugares Circulação de pedestres e carros Conexão de redes de transporte	Hierarquia entre espaços externos Conjunto de entradas Circulação legível com recantos	Transição na entrada
	3	Entrelaçamento entre edificação e lugar Acesso e respeito a porções de água	Ambientes semi-abertos ao longo dos limites Arcadas Escadas abertas Edifícios conectados Estacionamento camuflado	Demarcação de entrada coletiva Entrada principal da unidade
	4	Vistas Ruas permeáveis	Diversidade de usuários Equilíbrio de usos na cidade Comércio local Inserção de habitação e usos mistos	Diversidade de usuários Gradiente privacidade layout conjunto Edificação como complexo Porção principal da edificação

Legenda: (1) Conformação, (2) Progressão e Hierarquia, (3) Limites e Permeabilidade e (4) Contraste e Distinção. Fonte: Adaptado de Barros (2008, p. 171-172).

Quadro 5. Estratégia projetual para o senso de habitabilidade

PROPRIEDADES ESPACIAIS		HARMONIA ESPACIAL: RELAÇÃO ENTRE CONFORTO AMBIENTAL E PRIVACIDADE	SENTIDO DE LAR	OPÇÕES E FLEXIBILIDADE
	1	Orientação solar p/ espaço externo Formato alongado Unidades ao redor de pátio Unidades em fita Unidades em terraços escalonados	Espaço físico congruente espaço convívio Área comum no centro Cobertura envolvente Ambiência para refeições Nichos de luz Nicho para dormir Lareira Nicho infantil	Espaço físico congruente espaço de convívio
	2	Gradiente de intimidade	Gradiente de intimidade Transição na entrada Circulação interativa Variação de pé-direito Sequência de nichos Escada como passagem visível	Gradiente de intimidade Possibilidade de expansão Rigidez gradual
	3	Unidades agregadas com mais de uma orientação Estratégias para privacidade Terraço entre casa e passeio	Ambiente de entrada Varanda utilizável Gradiente das aberturas Janelas salientes para a rua Ambiente junto à janela Aberturas naturais Janelas com pinásios Parede semi-aberta	Flexibilidade de uso Cozinha integrada
	4	Gradiente privacidade layout conjunto Luz natural interna	Vistas Circulação com contraste Zonas de piso Cores quentes Paredes agradáveis ao tato Balcão iluminado	Diversidade de usuários Materiais apropriados

Legenda: (1) Conformação, (2) Progressão e Hierarquia, (3) Limites e Permeabilidade e (4) Contraste e Distinção. Fonte: Adaptado de Barros (2008, p. 173-174).

4.3. Modelos teóricos

Os modelos teóricos que contribuíram são: o modelo sugerido por Godoi (2018), para a definição de variáveis que compõem cada algoritmo; o modelo proposto por Chen *et al.* (2011), que incorpora a associação dos objetos à BIM; o modelo desenvolvido por Seghier *et al.* (2017), para extração automática dos dados do modelo BIM a serem analisados pelo projetista ainda na etapa de concepção; o modelo para clusterização não supervisionada, através do *k-means*, aplicando o método de Elbow para a otimização do número de *clusters* apresentado por Raschka e Mirjalili (2017).

4.3.1 Modelo para definição de algoritmo

Ao analisar a obra de Alberti, *De re aedificatoria* (1485), Godoi (2018) propõem um modelo para a definição de variáveis que compõem cada algoritmo através da leitura analítica obedecendo à seguinte sequência:

1. Identificação das frases/parágrafos que contêm os parâmetros;
2. Desenhos de esquemas para explicar graficamente a relação entre os parâmetros;
3. Descrição e sentenças matemáticas, identificando os tipos de parâmetros envolvidos e a ligação entre eles.

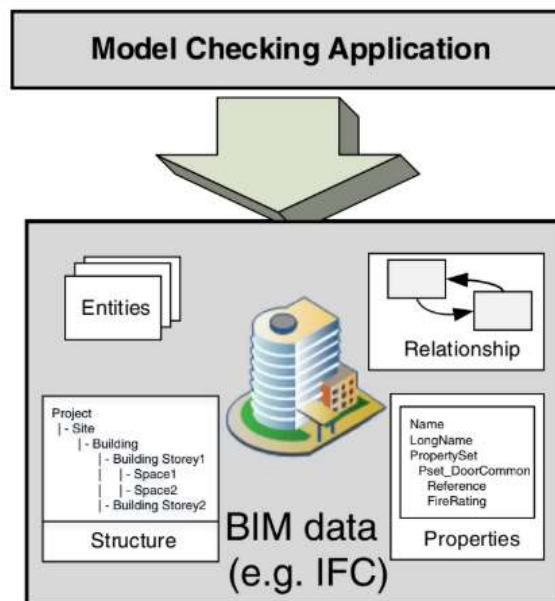
A autora constata ao final da análise que o pensamento algorítmico, paramétrico e generativo já estava presente na mente dos arquitetos pelo menos desde o Renascimento e que este processo tem tido seu uso intensificado dada a enorme capacidade de processamento das máquinas contemporâneas (GODOI, 2018).

Desta forma, este modelo destaca-se para a tradução dos parâmetros de projeto em algoritmos para o enriquecimento semântico projetual. Nesta pesquisa, porém, tornou-se necessário acrescentar três etapas: duas anteriores, para a Classificação dos parâmetros de projeto quanto ao LOD e Identificação das categorias de automatização, através do modelo apresentado por Solihin e Eastman (2015), e uma posterior, de associação do algoritmo ao BIM, modelo proposto por Chen *et al.* (2011).

4.3.2 Modelo para identificação das categorias de automatização

Solihin e Eastman (2015), em seu artigo, classificam regras para verificação de modelos de construção de acordo com sua complexidade computacional e requisitos impostos ao ambiente de execução de regras. A primeira classe de regra verifica dados explícitos, sua aplicação e implementação é relativamente simples, mas, de grande potencial para a qualidade e previsibilidade do modelo. Como ilustra o diagrama da Figura 19, esta classe de regras verifica atributos explícitos e referências de entidades que existem dentro do conjunto de dados BIM.

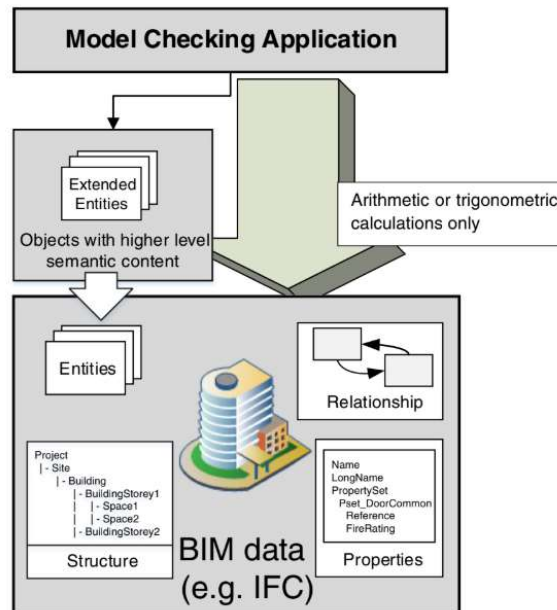
Figura 19. Diagrama de aplicação típica da primeira classe de verificação



Fonte: Solihin e Eastman (2015 p.74).

A segunda classe de regra requer alguns conhecimentos específicos e provavelmente esforços de desenvolvimento planejados. Como ilustra o diagrama da Figura 20, esta classe de regras envolve um *trade-off*, uma interpolação exigindo que o usuário deduza os dados versus derivados da verificação de regras dados (SOLIHIN E EASTMAN, 2015).

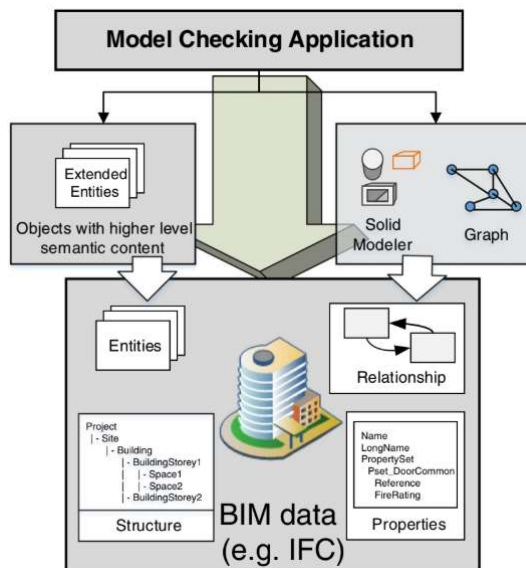
Figura 20. Diagrama de aplicação típica da segunda classe de verificação



Fonte: Solihin e Eastman (2015 p.74).

A terceira classe de regra requer uma extensão para a estrutura de dados que encapsula condições semânticas, envolvendo requisitos complexos (Figura 21).

Figura 21. Diagrama de aplicação típica da terceira classe de verificação



Fonte: Solihin e Eastman (2015 p.74).

De acordo com os autores, independente da classe de verificação a eficácia do processo envolve: (1) a conversão de regras escritas para interpretação manual em um formato (árvores de decisão) que seja passível de implementação de computador; (2) a definição da visão do modelo necessária para suportar a verificação, em termos de

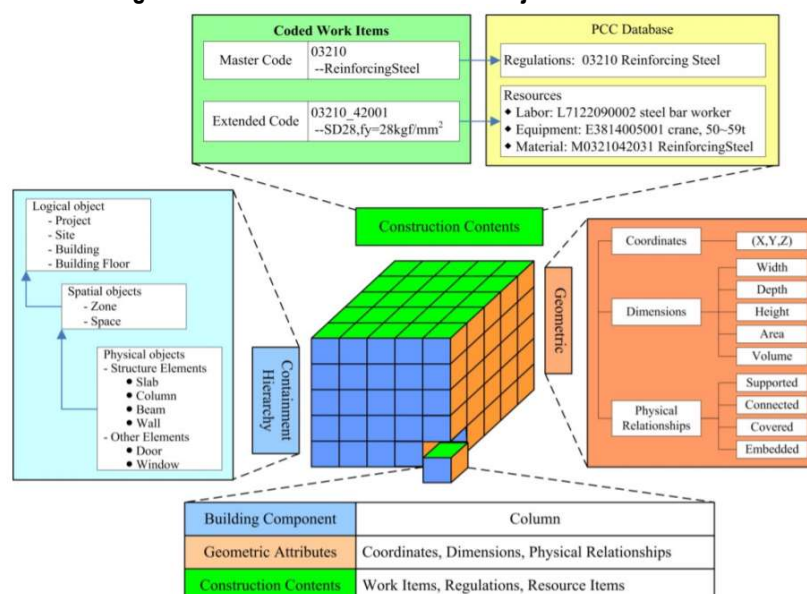
objeto, atributos e relações necessárias para checar diretamente ou indiretamente os dados; (3) a execução da regra, lidando com a lógica da regra, em termos de condições aninhadas, condições combinatórias e os problemas lógicos de testes de existência versus testes de universalidade; (4) relatar às partes interessadas os resultados da verificação da regra, de forma a facilitar a correção de questões identificadas; Por fim, (5) estabelecer procedimentos para correção automática de falhas nas regras.

4.3.3 Modelo para organização dos atributos de um objeto BIM

O modelo proposto por Chen *et al.* (2011) incorpora a associação dos objetos à BIM, através de vários tipos de informações necessárias para o planejamento, construção e gestão. Os autores analisam diversos processos discretos de classificação da informação realizados dentro da construção, como por exemplo a caracterização de dimensões, espaços, elementos, materiais, tipos de serviço, escalas diferentes de gerenciamento. As classificações organizam a estrutura dos atributos de um objeto BIM.

Estes atributos estão divididos em três aspectos: atributos geométricos, contenção hierarquia, e conteúdo de construção (CHEN *et al.*, 2011), e são usados para apresentar as propriedades essenciais da construção componentes como ilustrado na Figura 22.

Figura 22. Estrutura de atributos em objetos BIM



Fonte: Chen *et al.* (2011, p.181).

Para esta pesquisa o modelo foi adaptado, no modelo proposto, na relação dos atributos em três aspectos: (A) classificação do objeto, (B) dados geométricos do objeto e (C) informação da construção, conforme ilustrado na Figura 23 e descrito no Capítulo 5 (5.1).

Figura 23 – Atributos do modelo BIM



Fonte: Autoria Própria.

4.3.5 Modelo para extração automática dos dados do modelo BIM

O modelo desenvolvido por Seghier *et al.* (2017), para extração automática dos dados do modelo BIM a serem analisados pelo projetista ainda na etapa de concepção, foi desenvolvido para auxiliar o projetista durante processo de projeto de construções sustentáveis. Os autores visam, através destes estudos, suprir a deficiência, nesta fase, de ferramentas e fluxos de trabalho que garantam *feedback* em tempo real. Ponto de concordância à esta pesquisa, porém, a ênfase deste trabalho versa sobre a relação humano-ambiente.

O fluxo de trabalho proposto por Seghier *et al.* (2017), para a avaliação do projeto, baseia-se na integração VPL e BIM. De forma que os dados são extraídos do modelo BIM e gerenciados através das ferramentas Revit, Excel e Dynamo, como propõem-se nesta pesquisa. Os instrumentos e caminhos percorridos são detalhados nos Capítulos 5 e 6.

4.3.6 Modelo para clusterização não supervisionada

De acordo com Raschka e Mirjalili (2017) um dos desafios da aprendizagem não supervisionada é que não conhecemos a resposta definitiva. Neste sentido, não é possível aplicarmos as melhores práticas utilizadas a fim de avaliar o desempenho de

um modelo supervisionado. Sendo assim, dentre outros métodos, diversos autores propõem para os casos não supervisionados a clusterização (WATT, *et al*, 2016; RASCHKA; MIRJALILI, 2017), cujo objetivo é encontrar um agrupamento natural, cujos dados de um mesmo *cluster* são mais similares entre si do que àqueles de *clusters* diferentes.

Um dos mais populares algoritmos de clusterização não supervisionada, é o *k-means*, amplamente aplicado na indústria e na academia (GOODFELLOW; COURVILLE, 2016; HONDA, 2017; RASCHKA; MIRJALILI, 2017). De acordo com Honda (2017) a tarefa do algoritmo é **encontrar o centróide** mais próximo (por meio de alguma métrica de distância) e atribuir o ponto encontrado a esse cluster. Após este passo, os **centróides são atualizados** sempre tomando o valor médio de todos os pontos naquele cluster até que se estabilize (*grifo nosso*). Apesar, do algoritmo o *k-means* ser muito bom em identificar *clusters*, uma das desvantagens é ter que especificar o número de clusters, *k*, a priori. Uma escolha inadequada para *k* pode resultar em desempenho de cluster fraco (RASCHKA; MIRJALILI, 2017).

Desta forma, uma das técnicas para manter a qualidade da clusterização é o auxílio na determinação do número ideal de clusters *k*. Neste sentido, o método de Elbow para a otimização do número de clusters é apresentado por Raschka e Mirjalili (2017), tal método tem por base estimar o número ideal de *clusters k* para uma dada tarefa. Intuitivamente, pode-se dizer que, se **k aumenta**, a **distorção diminuirá**. Isso ocorre porque as amostras estarão mais próximas aos centróides a que estão atribuídas. A ideia por trás deste método é **identificar** o valor de **k** onde a distorção começa a aumentar mais rapidamente (RASCHKA; MIRJALILI, 2017),

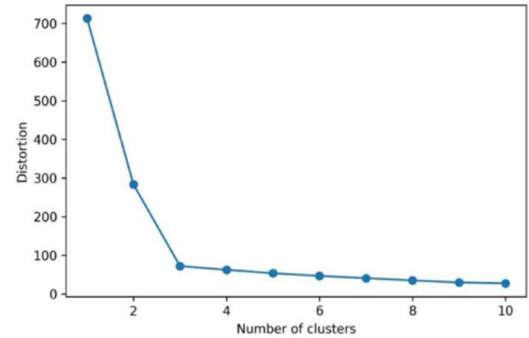
Esta ideia fica mais clara através da análise da Figura 24. Podemos observar através da imagem à direita, o resultado gráfico da distorção para diferentes valores de **k**, e uma quebra abrupta em $k=3$, o que é evidência que 3 é de fato uma boa escolha para o número de *clusters* neste conjunto de dados.

Figura 24. Método de Elbow

```

>>> distortions = []
>>> for i in range(1, 11):
...     km = KMeans(n_clusters=i,
...                 init='k-means++',
...                 n_init=10,
...                 max_iter=300,
...                 random_state=0)
>>>     km.fit(X)
>>>     distortions.append(km.inertia_)
>>> plt.plot(range(1,11), distortions, marker='o')
>>> plt.xlabel('Number of clusters')
>>> plt.ylabel('Distortion')
>>> plt.show()

```



Fonte: Adaptado de Raschka e Mirjalili (2017 p 514 e 515).

Esta combinação, entre o algoritmo *k-means* e o Método de Elbow, foi selecionada para esta pesquisa. Porém, ressalta-se que outros métodos também poderiam ser aplicados, esta pesquisa restringe-se apenas a estabelecer uma metodologia e provocar que pesquisas futuras possam avançar neste campo.

5. FORMULAÇÃO DA SOLUÇÃO

Como levantamos anteriormente, apesar da robustez de pesquisas voltadas à qualidade percebida pelo usuário e inovadores processos de concepção do projeto arquitetônico, a indústria da construção, especificamente no que diz respeito à concepção de projetos em HIS, continua arraigada ao arcabouço ineficaz, vide os recentes relatos sobre o maior programa do governo MCMV (KOWALTOWSKI, D. *et al*, 2015 e 2018).

No entanto, o cenário nacional mostrou recentemente a intenção de incorporar ao programa a tecnologia BIM, justificando que a adoção da metodologia reduz erros e riscos, induz o cumprimento de prazos e oferece maior confiabilidade aos projetos, com um controle preciso das obras, maior produtividade e economia de recursos (ABDI, 2019). Esta adoção não evidencia a melhoria das soluções de projeto, como um dos objetivos, mas, introduz a tecnologia e pode proporcionar novas experimentações quando associada à APC, cujo potencial para melhorar a qualidade das HIS no Brasil foi identificado por Rappl e Medrano (2017).

Como se propõem ao longo desta pesquisa, a adoção conjunta de SGs, ESBIM e AM para viabilizar a avaliação de projeto durante a concepção arquitetônica, pode contribuir com essas melhorias favorecendo o processo de projeto principalmente, através da possibilidade de incorporação de objetivos práticos e sociais com ênfase na relação humano-ambiente, mediante o enriquecimento semântico associado a propriedades em modelos BIM.

Fundamentada em corroborar com o processo de projeto, incorporando o conhecimento da relação ser humano – ambiente (parâmetros de projeto) à modelagem da informação através da aplicação da VPL, BIM e IA, em derivações geradas por SGs, esta pesquisa desenvolve uma **solução** composta por **quatro métodos** que geram: modelos, constructos, métodos e instâncias. O **primeiro** é um **método** para escolha de parâmetros de projeto aplicáveis à construção de algoritmos para o enriquecimento semântico projetual. (Seção 5.1). O **segundo** é um **método** para algoritmizar parâmetros de projeto (Seção 5.2). O **terceiro** é um **método** para associar o Modelo de

Informação ao algoritmo (Seção 5.3). O **quarto método**, para dar suporte à tomada de decisão projetual (Seção 5.4). Tais métodos encontram-se detalhados no Capítulo 3. Para a formulação dos artefatos utilizam-se modelos teóricos que contribuem para o desenvolvimento de cada um.

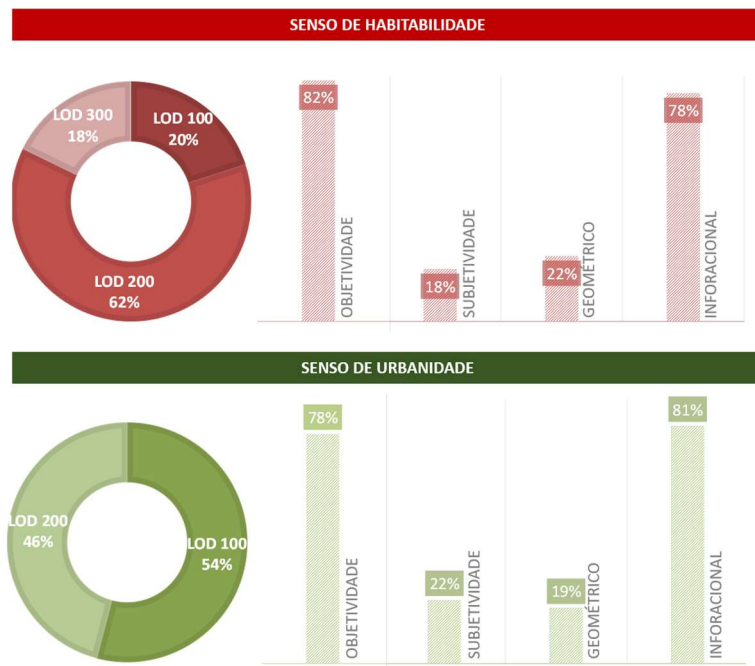
Esta pesquisa propõe interligar, por meio da instanciamento, esses modelos através da operacionalização dos métodos. Para isto, foram desenvolvidos instrumentos e recursos tecnológicos apresentados a seguir (5.1, 5.2, 5.3 e 5.4) e seus testes de implementação no capítulo 6.

5.1. Escolha dos parâmetros de projeto aplicáveis à construção de algoritmos para o enriquecimento semântico projetual

A formulação desta etapa partiu da coletânea de parâmetros de projeto (74) organizada e apresentada por Raquel Barros (2008) em duas escalas que compõem a proposta de estratégia metodológica de apoio ao processo projetual: Senso de Urbanidade (37) e Senso de Habitabilidade (45), importante neste momento ressaltar que um determinado parâmetro de projeto pode fazer parte de um ou ambos os grupos.

A Figura 25 apresenta a análise dos 74 parâmetros de projeto que permitiu não apenas classificá-los quanto ao LOD dentro as escalas de aplicação: Senso de Urbanidade e Senso de Habitabilidade, como também quanto às categorias de automatização, se explícita (objetivo) ou implícita (subjetivo) e geométrica ou informacional. Desta classificação, no LOD 200, foram considerados passíveis de parametrização 35 parâmetros de projeto pela automatização ser objetiva envolvendo dados geométricos ou informacionais.

Figura 25. Classificação dos *parâmetros de projeto* quanto ao LoD e identificação das categorias de recomendação



Fonte: Autoria Própria.

A seguir, no Quadro 6, têm-se os 35 *parâmetros de projeto*, agrupados pela escala de aplicação sugerida por Barros (2008), organizados em ordem alfabética (em sua tradução) e seguidos da numeração adotada na publicação original.

Quadro 6. *Parâmetros de projeto* parametrizáveis dentro da escala de aplicação

SENSO DE URBANIDADE (16 - PARÂMETROS DE PROJETO)	SENSO DE HABITABILIDADE (23 - PARÂMETROS DE PROJETO)
Ambientes semiabertos ao longo dos limites (166) Arcadas (119) Caminhos e lugares Edifícios conectados (108) Entrelaçamento de edificação e lugar (168) Escadas abertas (158) Estacionamento Camuflado (97) Estacionamentos pequenos (103) Unidades ao redor do pátio (N1)* Unidades em fita* (38) Orientação solar para o espaço externo* (105) Praças pequenas (61) Recuo frontal nulo (122) Ruas permeáveis (51) Unidades em fita (38) Vistas* (192)	Aberturas naturais (221) Ambiência para refeições (182) Ambiente junto à janela (180) Balcão iluminado (199) Circulação com contraste (135) Escada com passagem visível (133) Gradiente de intimidade (127) Janelas salientes para a rua (164) Lareira (181) Layout da cobertura (209) Unidades ao redor do pátio (N1)* Mais de uma orientação para unidades agregadas (N2) Estratégias para privacidade (N3) Nicho para dormir (188) Nichos infantis (203) Orientação solar para o espaço externo* (105) Parede semiaberta (193) Posição e luz (128) Unidades em fita* (38) Varanda utilizável (167) Variação de pé-direito (190) Vistas* (192) Zonas de piso (233)

Fonte: Autoria Própria.

5.2. Algoritmização dos parâmetros de projeto

Após a identificação dos 35 parâmetros de projeto passíveis de automatização, detalhados anteriormente, percebeu-se que a escala de aplicação sugerida por Barros (2008) apresentava quatro agrupamentos distintos (Quadro 7), vinculados às características de composição do modelo BIM.

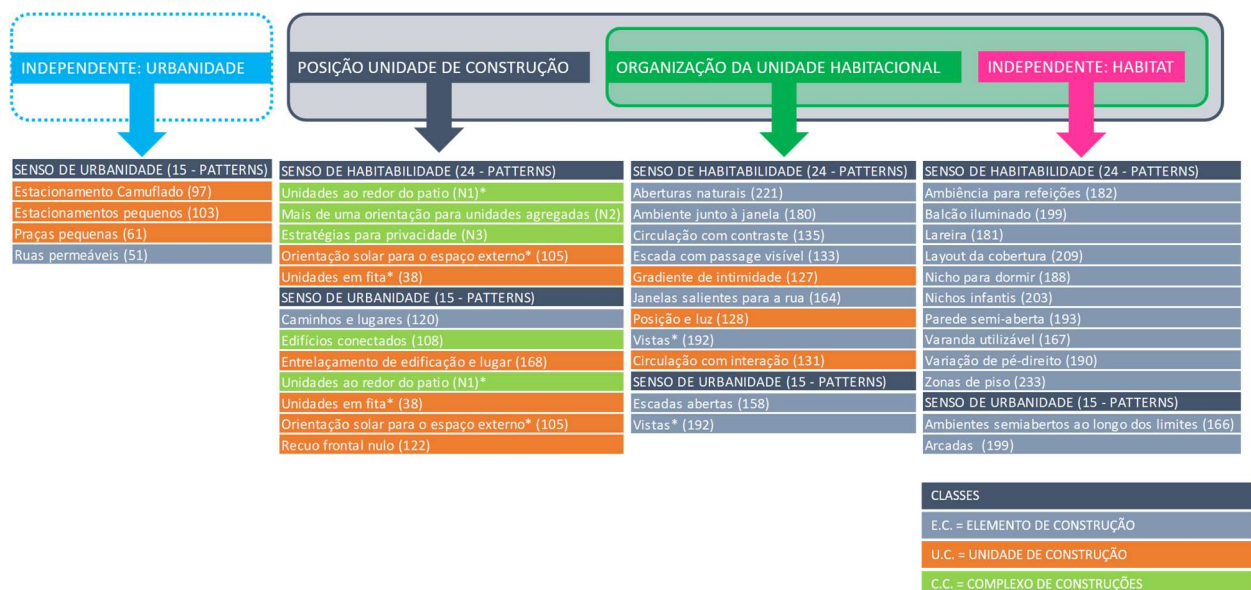
Quadro 7. Tipos de Agrupamento

TIPOS DE AGRUPAMENTO	DESCRIÇÃO
1. Independente: Urbanidade	Contemplam questões ao exterior da edificação.
2. Posição da Unidade de Construção	Contemplam questões vinculadas apenas à posição da edificação.
3. Organização da Unidade Habitacional	Contemplam questões da estrutura, organização e layout da edificação.
4. Independente: Habitat	Contemplam questões pontuais de ambientes internos da edificação.

Fonte: Autoria Própria.

A partir deste novo agrupamento, foi possível estabelecer entre eles uma relação de hierarquia e identificar as classes de objetos: elemento de construção (EC), unidade de construção (UC) ou complexo de construções (CC) de cada parâmetro de projeto (Fig. 26).

Figura 26. Escala de Agrupamento dos parâmetros de projeto e identificação das classes de objeto



Fonte: Autoria Própria.

A seguir apresenta-se a proposta de algoritmização dos parâmetros de projeto representativos dos grupos G1, G2, G3 e G4: ruas permeáveis (51-green streets)

orientação solar para espaço externo (105-*south facing outdoors*), gradiente de intimidade (127-*intimacy gradient*) e zonas de piso (233-*floor surface*), apresentados na seção 6.1, os demais encontram-se no Apêndice A. Inicia-se pela identificação do parâmetro de projeto através do seu nome seguido da frase com a solução proposta, nesta destacam-se as frases/parágrafos com as variáveis que foram identificadas. Posteriormente descrevemos matematicamente a sentença resultante do algoritmo ilustrado pelo fluxograma, através das linguagens matemáticas explicitadas por Bianconi (2002): (1) proposicional, aplicando as conjunções “and” ($\wedge$), “or” ($\vee$) e a relação de implicação: que pode ser descrita por $\Rightarrow$ ou ainda, se A, então B; e a (2) quantificação, aplicando os operadores da matemática básica (+, =, $\cap$, entre outros).

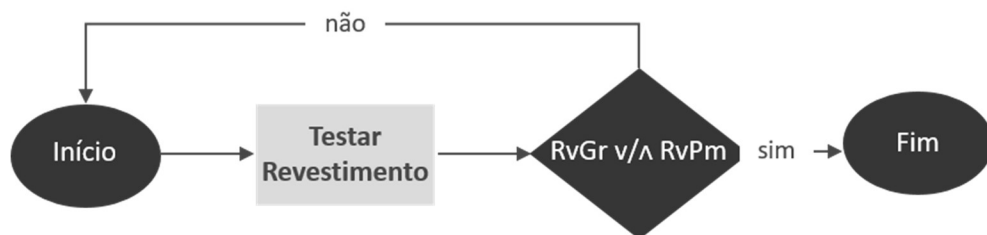
5.2.1 Ruas permeáveis (51-*green streets*)

O parâmetro de projeto Ruas Permeáveis de senso de urbanidade prevê que “**Ruas locais** podem ser **gramadas e/ ou revestidas com elementos que não impermeabilizem** totalmente o solo.” (grifo nosso). A expressão matemática equivalente é a Equação (1) representada no fluxograma da Figura 27.

$$Vcl \Rightarrow RvGr \vee / \wedge RvPm \quad (1)$$

Onde: Vlc= Vias locais; RvGr = Revestimento em grama; RvPm = Revestimento permeável.

Figura 27. Fluxograma (ruas permeáveis)



Fonte: Autoria Própria.

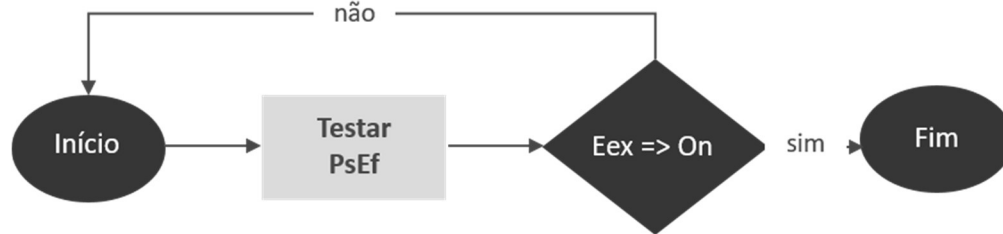
5.2.2 Orientação solar para espaço externo (105-south facing outdoors)

O parâmetro de projeto Orientação solar para espaço externo de senso de urbanidade prevê “**Posicionar edificações ao Sul dos espaços externos**, mantendo estes ao Norte (se no hemisfério Sul).” (grifo nosso). A expressão matemática equivalente é a Equação (2) representada no fluxograma da Figura 28.

$$PsEf \Rightarrow Os(Eex); Eex \Rightarrow On \quad (2)$$

Onde: PsEf = Posição da edificação; Os = Orientação sul; Eex = Espaço externo; On = Orientação norte.

Figura 28. Fluxograma (orientação solar para espaço externo)



Fonte: Autoria Própria.

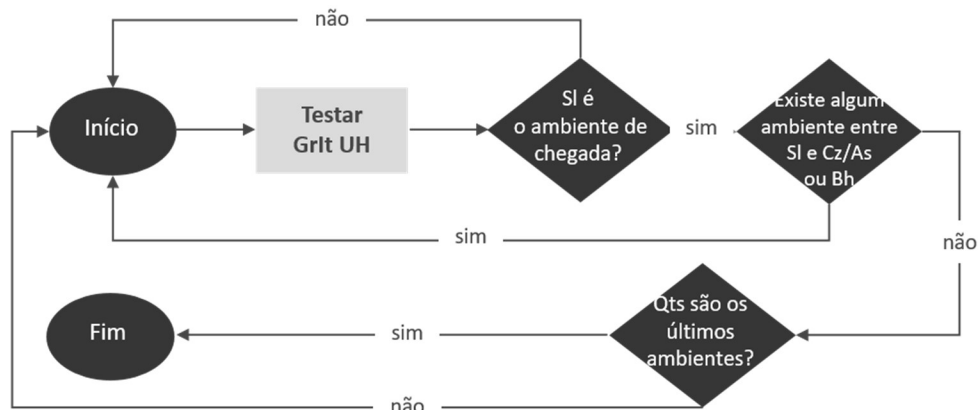
5.2.3 Gradiente de intimidade (127-intimacy gradient)

O parâmetro de projeto Gradiente de intimidade de senso de habitabilidade prevê que “Arranje os **ambientes da UH** de modo a criar **sequência** que **comece pelas partes mais públicas** e se encaminhe para áreas um pouco mais privadas, finalizando com os domínios mais íntimos.” (grifo nosso). A expressão matemática equivalente é a Equação (3) representada no fluxograma da Figura 29.

$$GrIt(UH) \Rightarrow Sl \rightarrow (Cz \wedge As) \vee Bh \rightarrow Qt \quad (3)$$

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

Figura 29. Fluxograma (gradiente de intimidade)



Fonte: Autoria Própria.

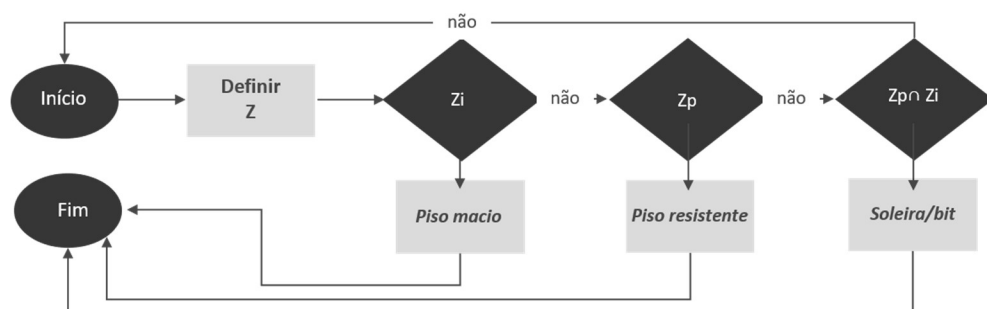
5.2.4 Zonas de pisos (233-floor surface)

O parâmetro de projeto Zonas de pisos de senso de habitabilidade prevê “Crie **zonas pública e íntima**, correspondendo respectivamente a **materiais resistentes e macios**. **Marque** claramente a **transição** entre elas.” (grifo nosso) A expressão matemática equivalente ao parâmetro de projeto é a Equação (4) representada no fluxograma da Figura 30.

$$\frac{Z_p}{Z_i} = As + Am; Z_p As \cap Z_p Am = sl \quad (4)$$

Onde: Z_p=Zona pública; Z_i=Zona íntima; As=Área seca; Am=Área molhada; sl=soleira.

Figura 30. Fluxograma (zona de piso)



Fonte: Autoria Própria.

5.3.Associação do Modelo de Informação ao algoritmo.

O terceiro artefato envolve um método para a associação do Modelo de Informação ao algoritmo criado. Este método desdobra-se em dois outros, o **primeiro** para transcrever em BIM as geometrias resultantes dos SGs, neste caso da GF; e o **segundo** método propõem alternativas para implementação dos parâmetros de projeto, através do uso combinado de ferramentas de autoria de modelos e ferramentas VLP.

A classificação do objeto está relacionada à classe que pertence: elemento de construção (EC), unidade de construção (UC) ou complexo de construções (CC), ou ainda, a sua classificação hierárquica e/ou de composição. Os dados geométricos do objeto relacionam-se diretamente à sua modelagem (coordenadas, dimensões e relações que estabelecem com objetos/ componentes adjacentes). Já para a classificação da informação BIM, seguimos os conceitos básicos adotados pela ABNT NBR 15965 – Sistema de classificação da informação da construção, norma nacional correlacionada com a classificação OMNICALASS.

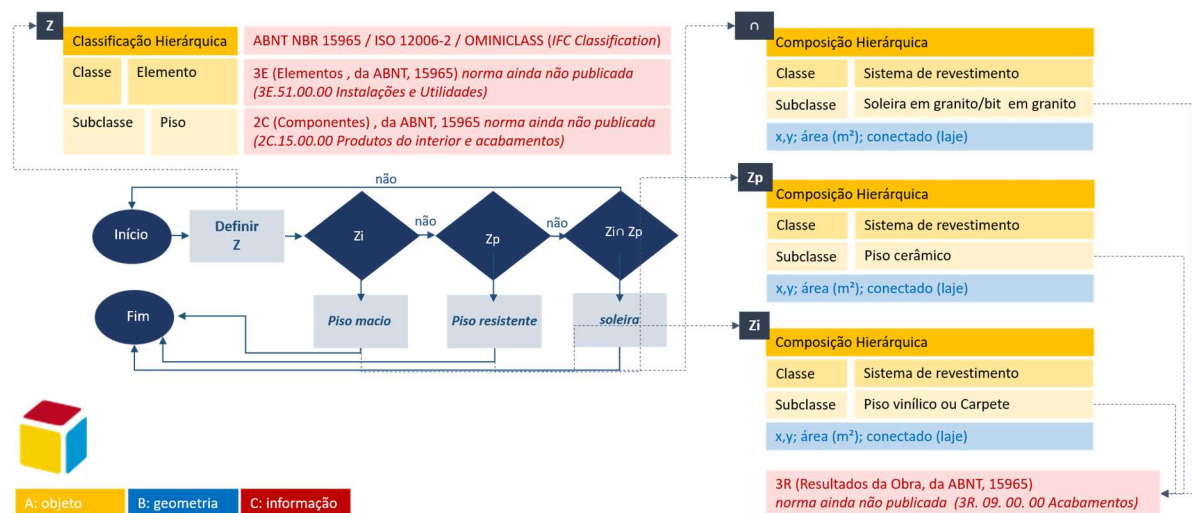
Vale ressaltar que a classificação da informação é fundamental por contribuir em diversas áreas e etapas do processo de projeto garantindo assertividade e interoperabilidade, podendo ser feita através de diferentes sistemas de classificação, dentre os principais apresentados por Silva e Amorim (2011) estão o *Masterformat* (hierárquica), o *Unifomat* (facetadas) ou ainda, o já citado OMNICALASS (hierárquicas e facetadas).

No cenário nacional, vemos essa preocupação refletida nos esforços empenhados pela comissão de estudos da ABNT, a CEE-134 – Comissão de Estudo Especial de Modelagem de Informação da Construção (BIM), cujo trabalho resultou na publicação das seguintes normas: *ABNT NBR ISO 12006-2:2010 Construção de edificação – Organização de informação da construção – Parte 2: Estrutura para classificação* e *ABNT NBR 15965-Sistema de classificação da informação da construção*. A primeira refere-se a uma tradução da *ISO 12006-2* (2001), atualmente revisada para *ISO 12006-6:2015*, mas ainda não traduzida para o português. Esta norma apresenta uma estrutura geral para os sistemas de classificação da construção. Já a segunda, têm publicadas quatro das

sete partes previstas cujo conjunto, quando completo, será responsável por descrever em 13 tabelas uma *classe* da construção. A saber: *Parte 1: Terminologia e estrutura* (2011); *Parte 2: Características dos objetos da construção* (2012) – tabelas 0M-Materiais e 0P-Propriedades, *Parte 3: Processos da construção* (2014) – tabelas 1F-Fases, 1S-Serviços e 1D-Disciplinas e *Parte 7: Informação da construção* (2015) – tabela 5I-Informação. Das três partes restantes, a *Parte 6: Unidades da construção* ainda não foi publicada, mas, já teve o seu texto aprovado pela comissão – tabelas 4U-Unidades e 4A-Espaços. Restando, apenas a *Parte 4: Recursos da construção* – tabelas 2N-Funções Organizacionais, 2Q-Equipamentos e 2C-Componentes e *Parte 5: Resultados da construção* – tabelas: 3E-Elementos e 3R-Resultados da Construção (ABDIMDIC, 2017).

A seguir apresenta-se, através da Figura 31, um exemplo do modelo da associação dos algoritmos ao modelo BIM.

Figura 31. Zonas de Pisos (classificação BIM)



Para cada um dos 35 parâmetros de projeto identificados tem-se, a partir do fluxo proposto para o algoritmo, a identificação das variáveis como atributos em três aspectos: (A) classificação do objeto, (B) dados geométricos do objeto e (C) informação da construção, através do sistema proposto pela ABNT NBR 15965-Sistema de classificação da informação da construção. Tal classificação permite identificar possíveis relações de interdependência entre os parâmetros de projeto, ou seja, na variação de uma determinada *variável/atributo*, tendo por base um determinado parâmetro de projeto, a aplicação de outro será de alguma forma afetada.

5.4. Suporte à tomada de decisão projetual.

A aplicação da gramática da forma, assim como outros sistemas generativos, permite uma grande variedade de resultados, implicando ao projetista determinar uma forma de selecionar uma das soluções dentre o conjunto de derivações. Partindo da necessidade desta decisão projetual, cada uma das soluções apresentadas pelo algoritmo de Mayer (2012) será qualificada através enriquecimento semântico associado a propriedades em modelos BIM dos parâmetros de projeto selecionados, segundo o processo formulado acima.

Desta forma, frente à avaliação realizada através da gestão da informação da aplicação dos parâmetros de projeto, fez emergir a necessidade de incorporar a geração automática de conjuntos capazes de reduzir as derivações em subconjuntos capazes de auxiliar o projetista na decisão projetual. Como não há nenhuma indicação inicial de hierarquia ou ponderação sobre os parâmetros de projeto, como classificadores, consideramos a análise por meio da seleção de características não supervisionada.

Os passos, deste método, consistem em: (01) Tratamento dos dados, redução por média, normalização logarítmica ou algorítmica, se necessário, como propõem Haymaker *et al.* (2018); (02) Clusterização; (03a) Clusterização, método tradicional de agrupamento, o K-Means que implica na aplicação do Método Elbow, para definir o número de agrupamentos; e/ou (03b) Clusterização Hierárquica; (04) Decisão projetual, etapa inerente de análise e escolha do projetista frente a avaliação realizada nos universo apresentado pelas classificações, através da aplicação dos parâmetros de projeto.

6. IMPLEMENTAÇÃO E TESTES

Este capítulo tem por objetivo apresentar os caminhos percorridos, testes e resultados que permitiram a implementação dos artefatos. Para a avaliação dos artefatos, utilizou-se o método experimental por simulação, proposto por Hevner, March e Park (2004, *apud* LACERDA *et al.*, 2013), apresentado no capítulo 3.2.

6.1. Alternativas de implementação

Para a etapa de investigação da influência de alternativas de modelagem BIM, na avaliação dos indicadores de projeto, foi escolhido um *pattern* de cada grupo:

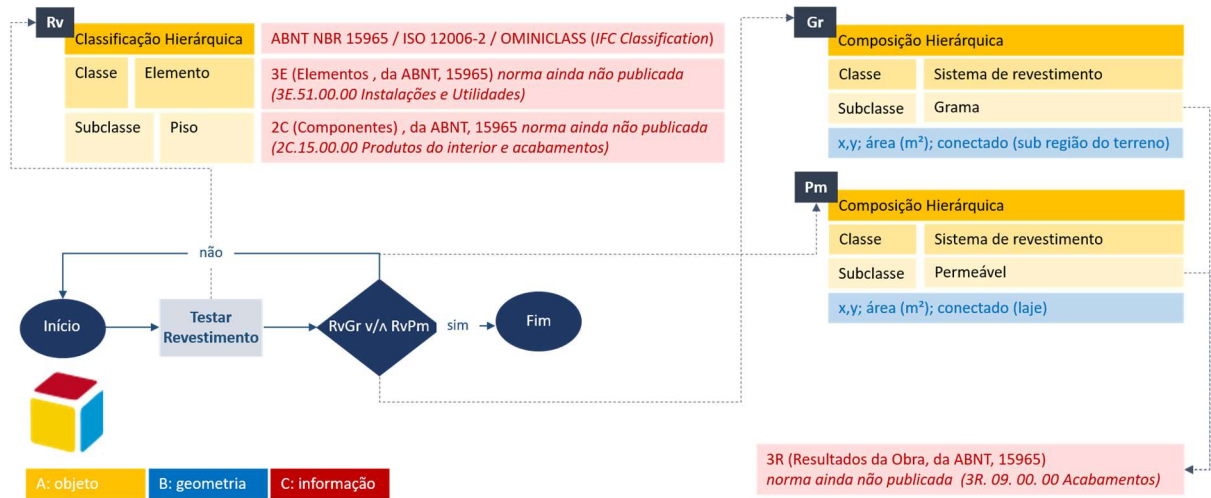
- GRUPO 1: Ruas permeáveis (*51-green streets*)
- GRUPO 2: Orientação solar para espaço externo (*105-south facing outdoors*)
- GRUPO 3: Gradiente de intimidade (*127-intimacy gradient*)
- GRUPO 4: Zonas de pisos (*233-floor surface*)

A seguir, encontra-se detalhada cada uma das investigações.

6.1.1 Grupo 1: Ruas permeáveis (*51-green streets*)

Investigou-se a influência de alternativas de modelagem BIM, para o Grupo 1 (G1), a partir do parâmetro de projeto Ruas Permeáveis: “*Ruas locais podem ser gramadas e/ ou revestidas com elementos que não impermeabilizem totalmente o solo.*” (grifo nosso). A seguir apresenta-se, através da Figura 32, o modelo da associação do algoritmo, Ruas Permeáveis, ao modelo BIM.

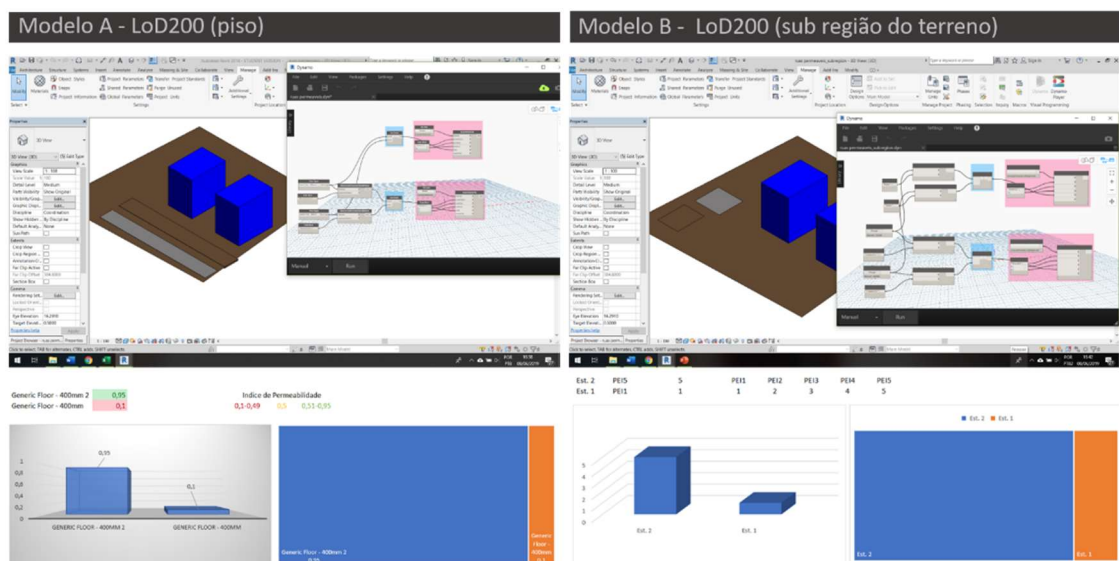
Figura 32. Ruas Permeáveis



Fonte: Autoria Própria.

Observa-se através desta associação que os dados a serem analisados vinculam-se diretamente às características dos materiais aplicados. Desta forma, a Figura 33 indica duas rotinas para o algoritmo que analisa o material empregado e sua permeabilidade. O **Modelo A** consiste na análise da característica permeabilidade, do material aplicado, no componente BIM tipificado piso, resultando em análises diretas da especificação vinculada ao objeto. Já no **Modelo B**, foi atribuída a característica de permeabilidade em 5 gradientes, durante a modelagem da sub-região, por não ser possível a leitura direta da permeabilidade do material aplicado.

Figura 33. Ruas Permeáveis: rotina de gerenciamento da informação



Fonte: Autoria Própria.

Constata-se que o modelo BIM necessário para esta avaliação pode apresentar, um dos seguintes dados de entrada: **Modelo A**, a criação de componentes tipificados: pisos; **Modelo B**, a delimitação das sub-regiões no terreno e posterior definição dos respectivos parâmetros vinculados à permeabilidade específica daquela área.

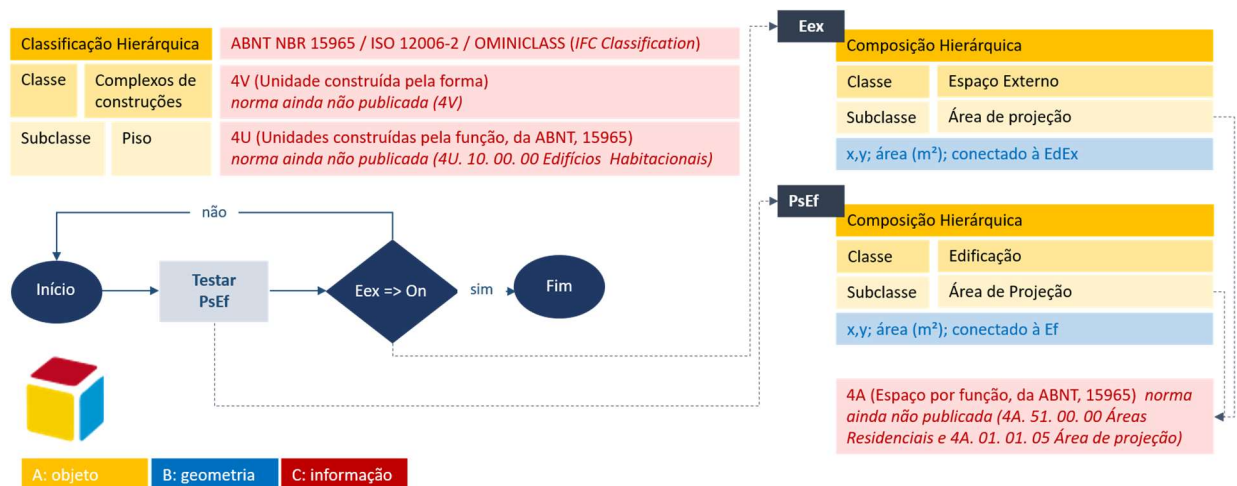
Apesar das duas formas apresentarem resultados capazes de serem analisados, considera-se como indicador mais apropriado os dados originados a partir do **Modelo A**, por considerar efetivamente a característica permeabilidade dos materiais, mesmo que este requeira um modelo mais detalhado. A limitação identificada no Modelo B é a necessidade de entrar com os parâmetros de permeabilidade durante a modelagem, enquanto no Modelo A essa identificação fica diretamente atribuída ao material.

Os recursos nativos do Dynamo foram utilizados para a seleção das categorias do modelo BIM, *piso* (modelo A) e *sub-região* (modelo B), a partir das quais, as informações para a avaliação foram extraídas.

Grupo 2: Orientação solar para espaço externo (105-south facing outdoors)

Investigou-se a influência de alternativas de modelagem BIM, para o Grupo 2 (G2), a partir do parâmetro de projeto Orientação solar para espaço externo: *“Posicionar edificações ao Sul dos espaços externos, mantendo estes ao Norte (seno hemisfério Sul).”* (grifo nosso). A seguir apresenta-se, através da Figura 34, o modelo da associação do algoritmo ao modelo BIM.

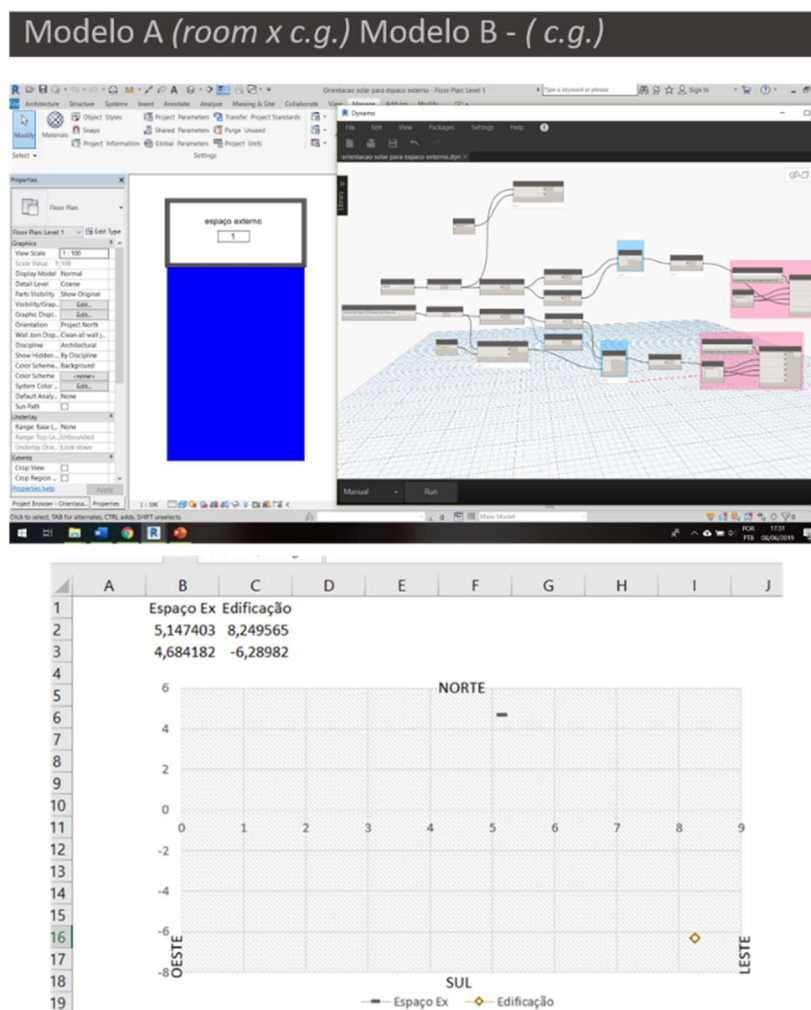
Figura 34. Orientação para espaço externo



Fonte: Autoria Própria.

Através desta associação é possível observar que os dados a serem analisados vinculam-se diretamente às características geométricas. Desta forma, a Figura 35 indica a rotina para este algoritmo, analisando a posição do espaço externo em relação à edificação.

Figura 35. Orientação para espaço externo: rotina de gerenciamento da informação



Fonte: Autoria Própria.

Este parâmetro de projeto apresentou também duas formas de implementação. O **Modelo A**, considera a posição do centro da *room* que identifica a sala em relação ao centro de gravidade do elemento criado para identificar o espaço externo. Já o **Modelo B**, considera a distância entre dois centros de gravidade, o do espaço externo e o da edificação. Nos dois casos analisados as duas rotinas apresentaram o mesmo resultado.

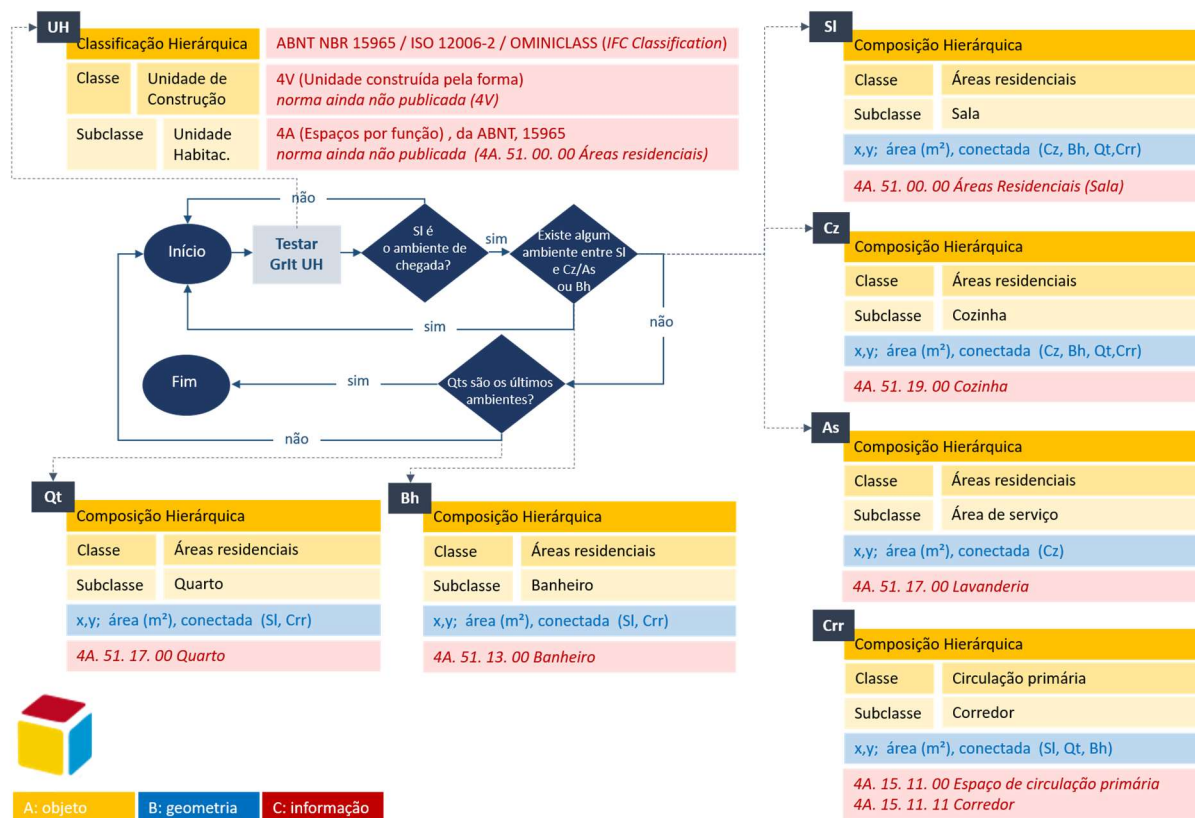
Constata-se que o modelo BIM necessário para esta avaliação pode apresentar, um dos seguintes dados de entrada: **Modelo A**, a criação de um elemento capaz de representar o espaço externo e a criação de *rooms*, seja automaticamente, ou através de um compartimento delimitado por objetos BIM tipificados (paredes); **Modelo B**, a criação de um elemento capaz de representar os espaços. Apesar das duas formas apresentarem resultados capazes de serem analisados, considera-se como indicador mais apropriado os dados originados a partir do **Modelo B**, por apresentar resultados adequados à fase de concepção em que o modelo possui menor grau de detalhamento. A limitação identificada no Modelo A é a necessidade criação de criação de *rooms*, enquanto no Modelo B, as características geométricas já estão definidas no elemento de massa criado.

Os recursos nativos do Dynamo foram utilizados para a seleção das categorias do modelo BIM, *room* e *elemento de massa*, representativo do espaço externo (modelo A) e *elementos de massa* (modelo B), a partir das quais, as informações para a avaliação foram extraídas.

6.1.2 Grupo 3: Gradiente de intimidade (127-*intimacy gradient*)

Investigou-se a influência de alternativas de modelagem BIM, para o Grupo 3 (G3), a partir do pattern Gradiente de intimidade: “Arranje **os ambientes da UH de modo a criar sequência que comece pelas partes mais públicas e se encaminhe para áreas um pouco mais privadas**, finalizando com os domínios mais íntimos.” (grifo nosso). A seguir apresenta-se, através da Figura 36, o modelo da associação do algoritmo, Gradiente de Intimidade, ao modelo BIM.

Figura 36. Gradiente de Intimidade

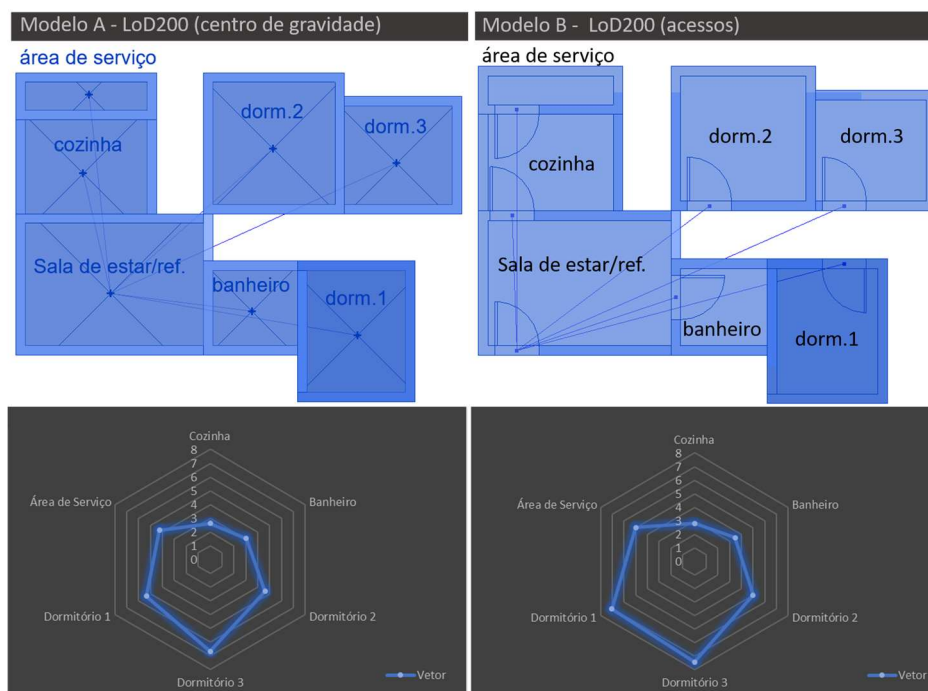


Fonte: Autoria Própria.

Observa-se através desta associação que os dados a serem analisados vinculam-se diretamente às características geométricas relacionais de cada ambiente.

A seguir apresenta-se o resultado da comparação da rotina desenvolvida para aplicação na etapa conceitual do projeto considerando duas formas possíveis de extração da informação da modelagem BIM. A rotina busca validar o gerenciamento das informações de modelos BIM LOD 200 através da análise do gradiente de intimidade na distribuição dos compartimentos gerados. A Figura 37 indica duas rotinas para o algoritmo Grau de intimidade, que analisa os arranjos dos compartimentos da unidade habitacional.

Figura 37. Gradiente de Intimidade: rotina de gerenciamento da informação



Fonte: Autoria Própria.

O **Modelo A** analisa os vetores entre os centros de gravidade (c.g.) dos compartimentos, tendo como ponto inicial o c.g. da Sala de estar/refeições (Sala de estar/ref.); enquanto, o **Modelo B** parte da definição dos respectivos acessos (portas), considerando a distância de todos os acessos ao acesso principal (porta da sala). Pode-se observar através do gráfico radar de avaliação de cada uma das situações uma pequena distorção nos comprimentos vetoriais. Entretanto, não chega a interferir na análise que o projetista deve fazer para tomar suas decisões ainda na etapa de concepção. Sendo assim, considera-se que os dois modelos apresentaram os dados de entrada necessários para esta análise.

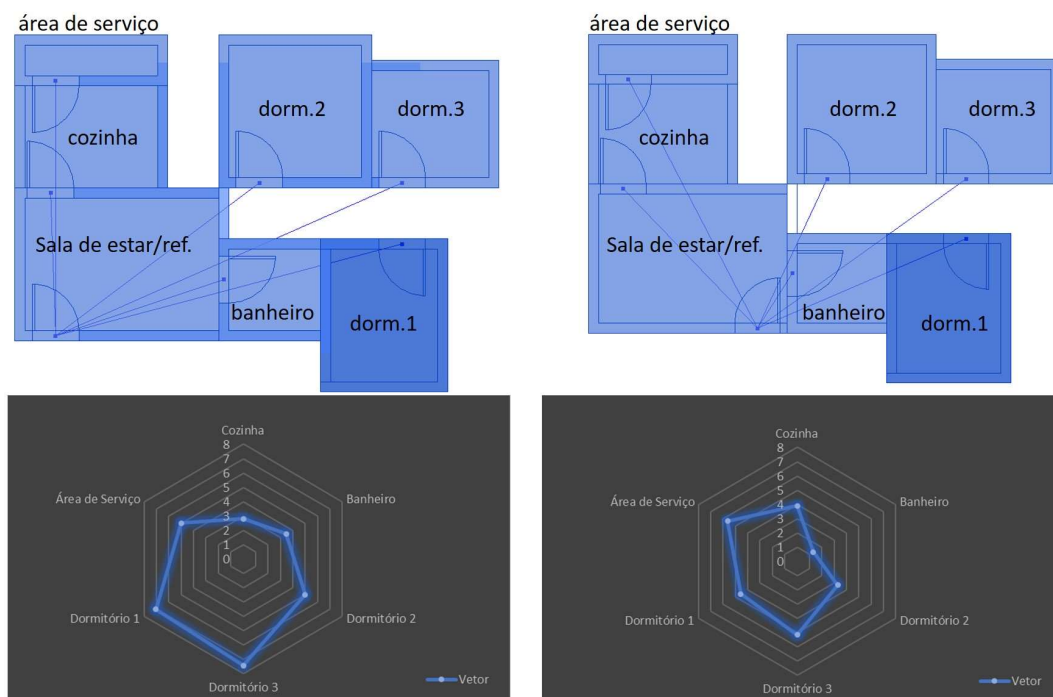
Ademais percebe-se na algoritmização deste pattern duas formas distintas de atingir os indicadores. A primeira vinculada apenas à geometria do modelo BIM, demonstrada pela extração dos dados do c.g. dos compartimentos; e a segunda, através do modelo B, requerendo uso de informação atribuída ao modelo através do componente BIM tipificado: porta.

Constata-se que o modelo BIM necessário para esta avaliação pode apresentar, um dos seguintes dados de entrada: Modelo A, a criação de *rooms* seja automaticamente, por ser um compartimento delimitado por objetos BIM tipificados

(paredes), ou pela separação das áreas (*room separator*); **Modelo B**, a delimitação dos compartimentos por objetos BIM tipificados (paredes) e posterior definição dos respectivos acessos (portas).

Apesar das duas formas apresentarem resultados capazes de serem analisados, considera-se como indicador mais apropriado para o Gradiente de Intimidade os dados originados a partir do **Modelo B**, por considerar efetivamente o acesso aos compartimentos, mesmo que este requeira um modelo mais detalhado. Pode-se observar, através da Figura 38, que sendo implementado desta forma, a sensibilidade de variação do algoritmo é maior. Observa-se que ao reposicionar a porta da sala o gráfico radar é totalmente alterado, quando a análise, se feita pelo **Modelo A**, permanecerá a mesma por não ter sido alterada a posição dos centros de gravidade. A limitação identificada no Modelo B é a necessidade do componente “porta”, uma vez que este elemento requer o objeto tipificado “parede”, ausente em compartimentos integrados ou no início do estágio de modelagem na fase de concepção.

Figura 38. Modelo B: sensibilidade de variação



Fonte: Autoria Própria.

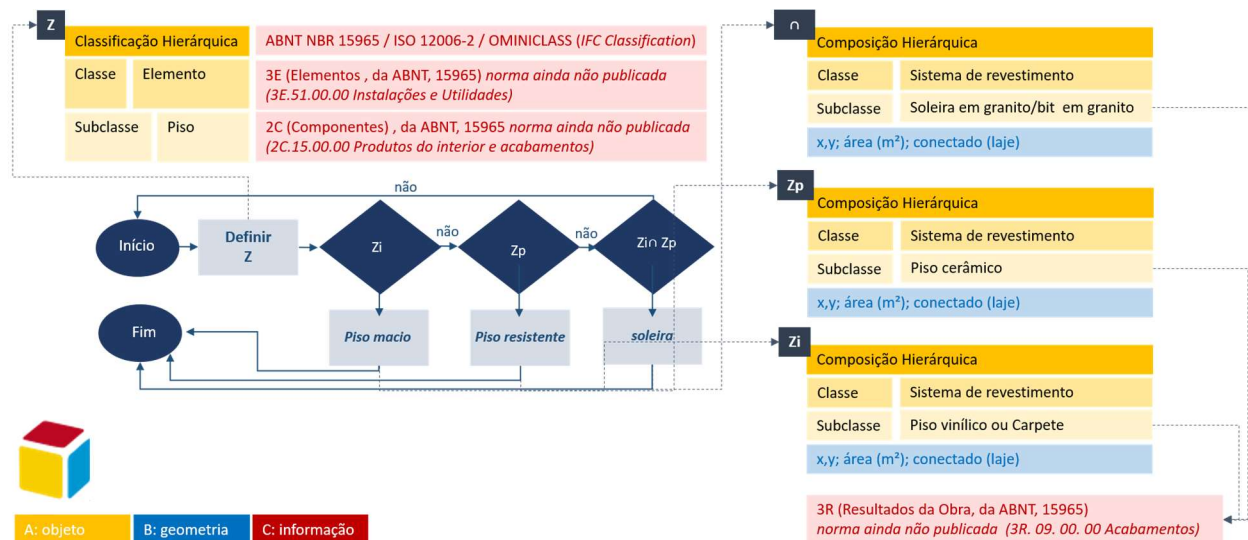
Os recursos nativos do Dynamo foram utilizados para a seleção das categorias do modelo BIM, *room* (modelo A) e portas (modelo B), a partir das quais, as informações para a avaliação foram extraídas.

6.1.3 Grupo 4: Zonas de pisos (233-floor surface)

Investigou-se a influência de alternativas de modelagem BIM na avaliação de um indicador de projeto, para o Grupo 4 (G4), a partir do parâmetro de projeto Zonas de Piso: “Crie zonas *pública e íntima*, correspondendo respectivamente a *materiais resistentes e macios*. Marque claramente a *transição* entre elas.” (grifo nosso)

A seguir apresenta-se, através da Figura 39, o modelo da associação do algoritmo, Zonas de pisos, ao modelo BIM.

Figura 39. Zona de pisos

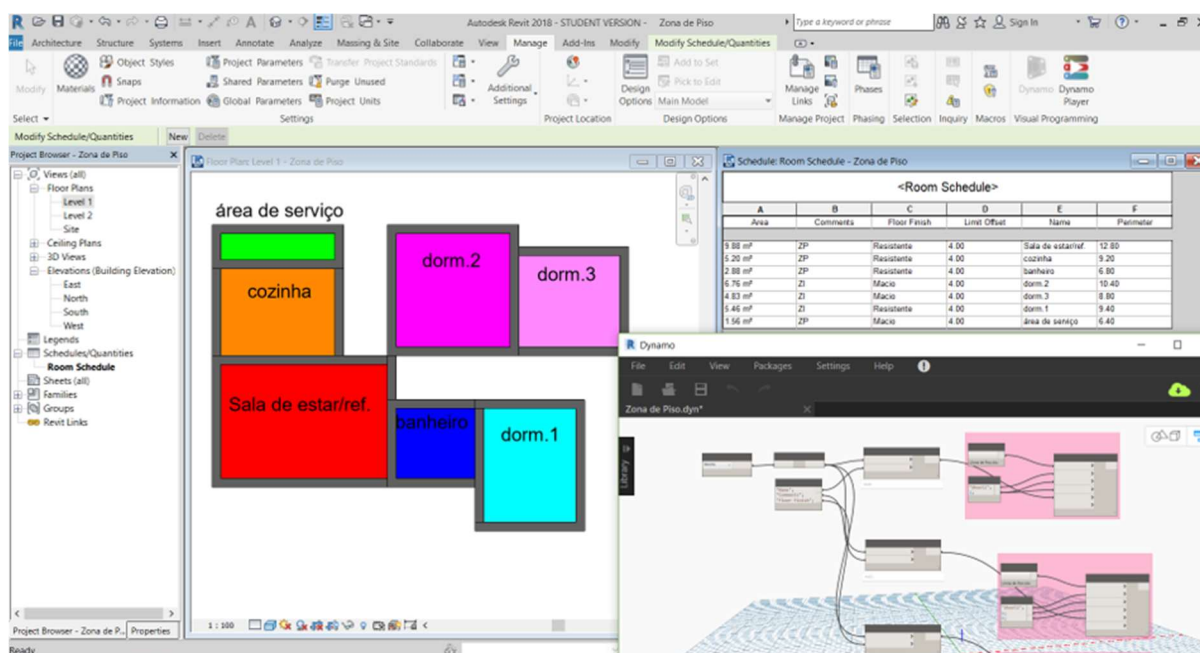


Fonte: Autoria Própria.

Através desta associação foi possível verificar que os dados a serem analisados vinculam-se diretamente às características dos materiais aplicados. Desta forma, foram propostas duas rotinas para o algoritmo, ambas analisam os materiais empregados, porém considerando as informações associadas à diferentes elementos.

A primeira, **Modelo A**, consiste na extração dos parâmetros associados ao espaço definido através da criação de *rooms*, enquanto o **Modelo B**, consiste na extração de dados vinculados ao objeto BIM tipificado, piso. Em ambos os casos há a possibilidade de edição dos parâmetros no modelo, bem como a extração das informações a partir dele (Fig. 40).

Figura 40. Zona de pisos: gerenciamento da informação



Fonte: Autoria Própria.

Apesar das duas formas apresentarem resultados capazes de serem analisados, considera-se como indicador mais apropriado para a etapa de concepção os dados originados a partir do **Modelo B**, por considerar efetivamente as características do objeto tipificado, mesmo que este requeira um modelo mais detalhado.

Os recursos nativos do Dynamo foram utilizados para a seleção das categorias do modelo BIM, *room* (modelo A) e pisos (modelo B), a partir das quais, as informações para a avaliação foram extraídas. A limitação identificada no Modelo B é a necessidade do objeto tipificado “piso”, que podem estar ausentes no início do estágio de modelagem na fase de concepção.

6.2. Transcrição em BIM da geometria resultante da GF paramétrica

Após a etapa de investigação da influência de alternativas de modelagem BIM, na avaliação dos indicadores de projeto, contatou-se pelo menos duas formas de implementar a mesma avaliação para cada um dos parâmetros de projeto selecionados. Tornando-se necessário realizar uma prova de conceito, para a escolha da rotina a ser implementada na avaliação conjunta dos parâmetros de projeto sobre as derivações da gramática da forma paramétrica.

Neste momento exclui-se o G1 da análise, uma vez que os dados resultantes não são diretamente relacionados aos outros grupos. Entende-se, neste caso, que o recorte deve ser realizado apenas para analisar conjuntamente os parâmetros de projeto que expressam interferências entre si. Contudo, ressaltamos que a mesma análise que será realizada entre os grupos, com ênfase no aspecto da edificação, pode ser realizada dentro do G1, na exploração de soluções voltadas aos aspectos urbanos.

A prova de conceito foi realizada através da aplicação das rotinas em dois momentos, conforme ilustra a Figura 41. O primeiro, considera a aplicação das duas rotinas sobre uma mesma unidade habitacional; já o segundo, considera a aplicação de cada uma das duas rotinas a quatro plantas distintas.

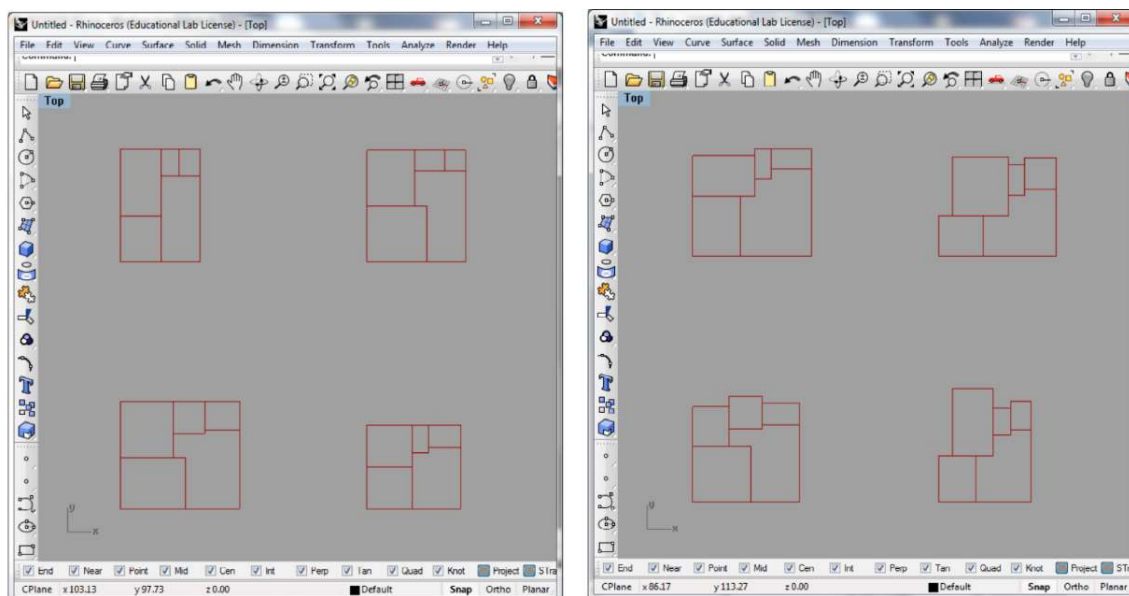
As plantas da HIS para esta etapa da análise foram escolhidas aleatoriamente dentre as derivações de variações geradas pelos algoritmos de derivação da gramática da forma paramétrica de Mayer (2012) em ambiente de programação do *Grasshopper*.

*“Dois modos de derivação da gramática paramétrica: o primeiro mantém o **perímetro** do polígono inicial **regular** e superfície variável conforme o intervalo de variação admissível dos perímetros dos compartimentos. Mantendo-se a regularidade do perímetro, a possibilidade de grandes diferenças significativas de configuração é restrita.*

*O segundo modo permite a transformação do perímetro, conforme o redimensionamento das partes do conjunto. Cada parte pode ter seu **perímetro alterado** em uma ou duas dimensões de modo independente de acordo com o intervalo de dimensões admissível. Os intervalos admissíveis estão relacionados as dimensões necessárias para a disposição do mobiliário.*
(MAYER, 2012.p.116; grifo nosso)

Consideramos para esta etapa, duas com perímetro regular (mantém o perímetro) e duas irregulares (podem ter seu perímetro alterado).

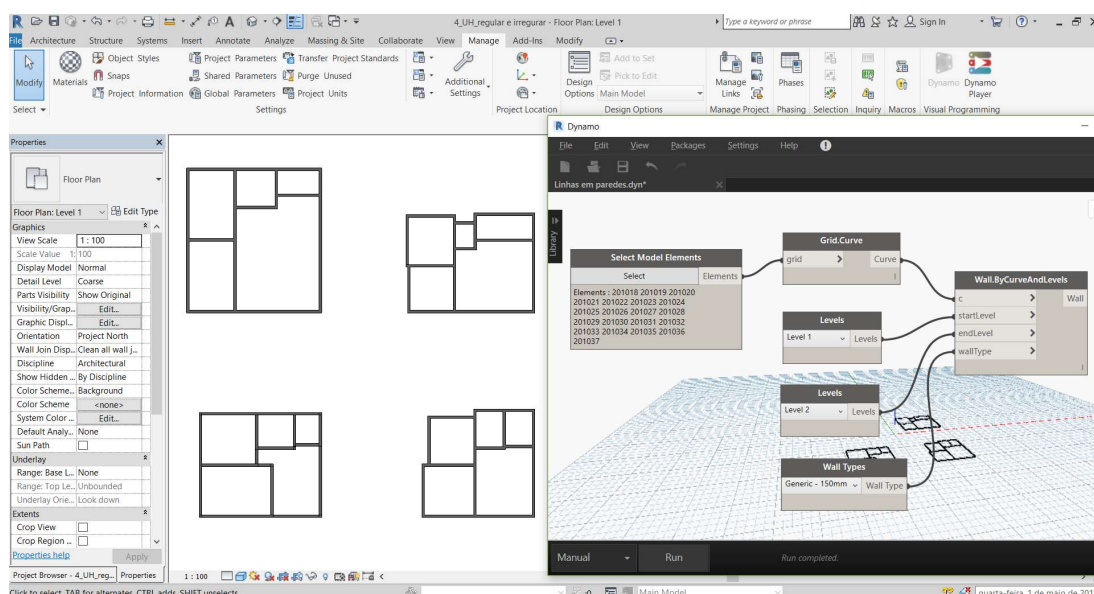
Figura 41. Amostra de exemplares dos dois tipos de derivação



Fonte: MAYER, R MAYER, R. A gramática da habitação mínima: análise do projeto arquitetônico da habitação de interesse social em Porto Alegre e Região Metropolitana. Tese (Doutorado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Faculdade de Arquitetura, Programa de Pós-Graduação em Arquitetura, Porto Alegre, 2012.p.110.

Como os algoritmos (Mayer, 2012) foram criados através do *Grasshopper*, em *Rhinoceros*, foi necessário a criação de uma rotina (*Dynamo*) que transformasse as plantas CAD (*Rhinoceros*) em BIM (*Revit*).

Figura 42. Convertendo geometria (linhas) em objeto tipificado (paredes).

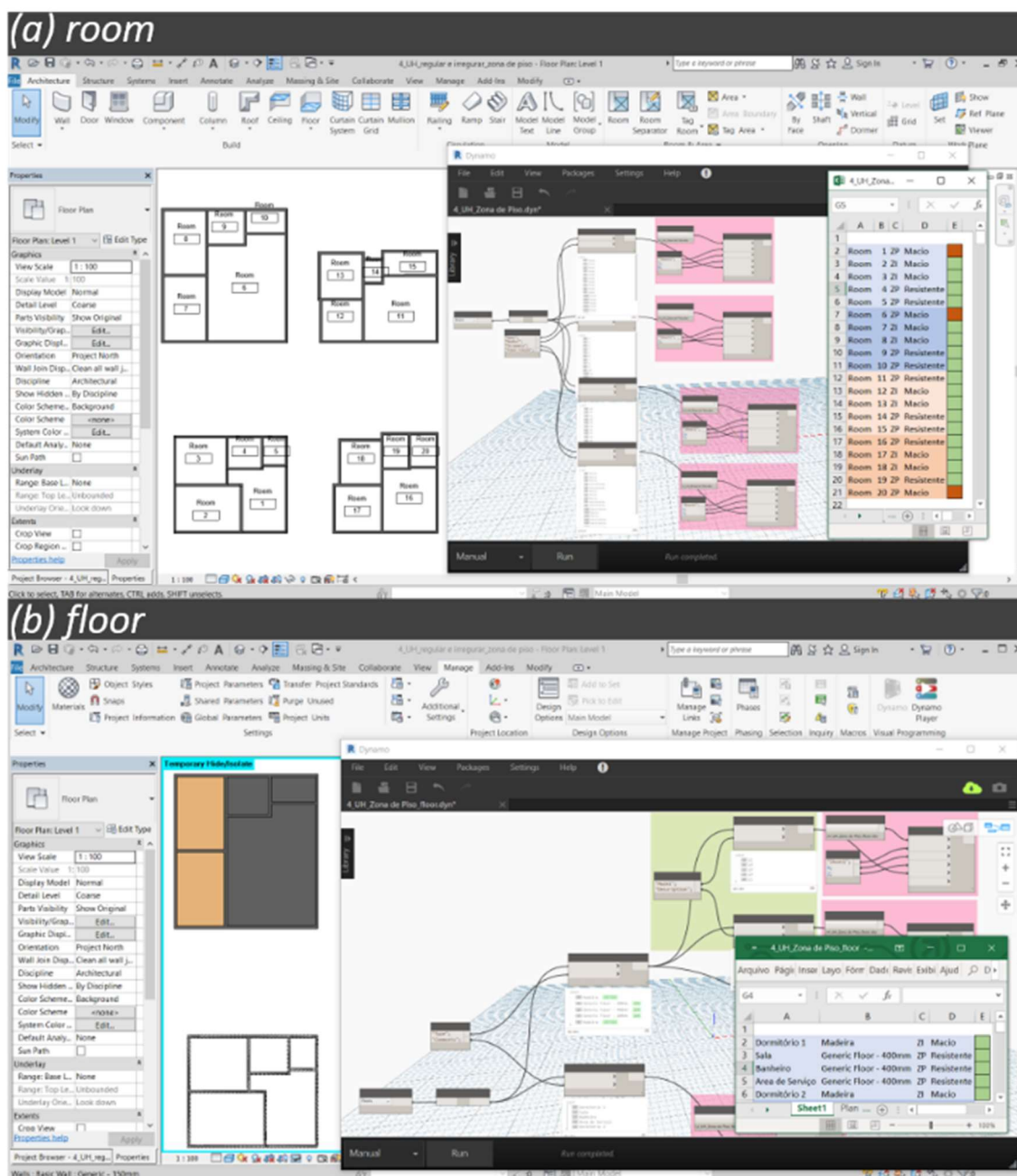


Fonte: Autoria Própria.

A rotina proposta para a criação de objetos tipificados (paredes) considerou as linhas da geometria inicial como eixo. Através desta conversão foi possível analisar a

aplicação das duas rotinas desenvolvidas para cada um dos *parâmetros de projeto*. Como, ilustramos através da Figura 43, para o parâmetro de projeto Zona de piso: (a) *room* e (b) *floor*.

Figura 43. Zona de piso: (a) *room* e (b) *floor*.



Fonte: Autoria Própria.

O Quadro 8, apresentado abaixo, apresenta o resumo desta etapa de análise, indicando a escolha da rotina para cada um dos três grupos, que será aplicada na instanciação.

Quadro 8 - Rotinas definidas para a implementação

GRUPO PATTERN	ROTINA
G2 Orientação solar para espaço externo	room e elemento de massa (modelo A)
G3 Gradiente de Intimidade	room (modelo A)
G4 Zona de piso	room (modelo A)

Fonte: Autoria Própria.

A definição das três rotinas levou em conta a possibilidade de extrair as informações necessárias da análise qualitativa sem um nível avançado de detalhamento do modelo. A extração dos dados através da aplicação das rotinas, G2, G3 e G4 foi consolidada numa única planilha, Figura 44, que constitui a instância numérica do conjunto de soluções arquitetônicas em BIM enriquecidas semanticamente pelos parâmetros de projeto.

Figura 44. Instância numérica das soluções projetuais

Instância numérica das soluções projetuais - Excel										
Arquivo Página Inicial Inserir Layout da Página Fórmulas Dados Revisão Exibir Ajuda Pesqui										
R7										
	A	B	C	D	F	H	J	L	N	O
1	GRUPO 3: Gradiente de Intimidade				GRUPO 4: Zonas de pisos				GRUPO 2	
2	Sala-Dormitório 1	Sala-Dormitório 2	Sala-Banheiro	Sala-Cozinha/ As	Sala	Dormit.1	Dormit.2	Banheiro	Coz/AS	Esp. Externo
3	3,332610692	3,440228422	4,563825745	3,73667046	1	2	2	1	1	90
4	3,499036059	3,456970534	4,760982605	3,280761564	1	2	2	2	2	90
5	4,55544668	4,788017728	5,346308975	4,236270485	2	2	2	2	2	270
6	3,556568798	3,54516855	4,590820842	3,924913708	2	1	2	1	2	180
7	4,630194672	4,145272798	4,77100692	3,586844903	2	1	2	1	1	0
8	3,596938337	3,717832945	4,616521446	3,999204142	2	2	2	1	2	270
9	3,613042743	3,845843507	5,15804523	3,534074578	2	2	2	1	2	270
10	3,056293314	3,235012976	4,6236793	4,197023199	2	2	2	2	2	90
11	3,014570797	3,579050823	4,836266808	4,150987458	2	2	2	2	2	180
12	2,914619801	2,996779	3,835940444	3,388453973	1	2	1	2	2	0
13	3,546686753	3,393847421	4,265494263	3,91970272	2	2	1	2	2	270
14	4,670805692	4,269966799	5,091480939	3,97961656	2	1	1	2	2	270
15	3,411164601	3,345721305	4,312281347	2,81747766	1	1	2	2	2	270
16	4,637460163	4,488212784	4,936450018	3,69381634	1	1	2	2	2	90
17	4,101920557	3,859938338	4,978274012	3,893776378	2	1	2	2	2	180
18	3,357378146	3,328693676	4,987967643	4,13613845	2	2	1	2	1	0
19	3,652098787	3,109972577	4,679632679	3,595749265	2	2	2	2	1	90
20	3,707670834	3,956430386	4,536339182	4,325268633	2	2	2	2	1	90
21	3,688889074	3,78587928	5,087452138	4,290095224	2	2	2	2	1	270
22	4,193238498	4,231100373	6,120607311	5,224611399	1	2	2	2	1	180
23	2,76282139	2,863539464	3,877425354	3,691671323	2	2	2	2	1	180
24	3,338497601	3,484850431	4,46872741	3,13874288	2	2	2	2	2	0
25	3,935473491	4,073797523	5,501510447	5,166895495	1	2	1	2	2	0
26	3,917270197	3,577308307	4,730298905	4,493575135	2	2	1	2	2	90
27	3,381722538	3,553424225	4,681638261	4,243920835	2	2	1	2	2	270
28	3,244889726	3,281842451	4,221960523	3,574958421	2	2	2	2	2	270
29	3,255920642	3,45555069	4,575028461	4,243920835	1	2	2	2	2	180
30	3,109110231	3,595675104	5,364227652	5,152689363	2	2	2	2	2	90
31	2,983600056	3,352232382	4,103807556	3,582229218	2	2	2	2	2	90
32	3,437895781	3,361765513	4,238284703	3,782295528	1	2	2	2	2	270
33	3,355259597	3,434385371	4,969876259	4,305382744	2	2	1	2	2	0
34	3,44571898	4,059505582	5,440054155	4,629898987	2	1	2	2	2	180
35	2,554944096	2,68447223	4,883396951	4,612938868	2	2	2	1	2	90
36	4,441384478	4,457561276	5,254814393	4,010342686	1	2	2	1	2	270
37	3,239678682	3,234913969	3,4206336	4,076066067	2	2	2	1	2	0
38	3,189224722	3,299951917	4,349611678	4,105532307	1	1	2	2	2	180
39	3,723489868	3,913292174	6,22377888	5,486167767	1	2	1	2	2	180
40	3,068204415	3,001389646	4,358859112	3,715720405	1	2	2	2	2	90
41	4,390712415	4,859070738	6,059885349	4,473000525	2	2	2	2	2	90

Fonte: Autoria Própria.

Através da imagem, apresentada acima (Fig.44), podemos observar todos os valores correspondentes aos parâmetros de projeto (combinação de colunas) escolhidos para a análise das 99 derivações (linhas). A primeira linha indica o agrupamento dos atributos de cada um dos parâmetros de projeto: quatro atributos para O GRUPO 3: Gradiente de intimidade; cinco atributos para o GRUPO 4: Zonas de pisos e apenas um para o GRUPO 2: Orientação solar para espaço externo.

Os quatro atributos, G3, analisam os vetores entre os centros de gravidade (c.g.) dos compartimentos, tendo como ponto inicial o c.g. da Sala de estar/refeições (Sala); os valores apresentados nas colunas respeitam a sequência a seguir: Dormitório 1, Dormitório 2, Banheiro e Cozinha/ Área de Serviço.

As cinco próximas colunas, apresentam os atributos referentes ao G4, que indicam a especificação de dureza (1) ou maciez (2) do piso; os valores são apresentados na sequência a seguir: Sala, Dormitório 1, Dormitório 2, Banheiro e Cozinha/ Área de Serviço.

Por fim, o atributo do G2, referente a orientação do espaço externo, é apresentada por valores modulares do ângulo correspondente: 0, 90, 180 ou 270.

6.3.Classificação das soluções projetuais

Esta proposta foi implementada e testada, em resultados apresentados pelo sistema generativo computacional para derivação de formas paramétricas da planta baixa de HIS, com perímetro regular, desenvolvido pela equipe do Laboratório para Simulação e Modelagem em Arquitetura e Urbanismo (SIMMLAB) para a pesquisa de doutorado de Rosirene Mayer (2012).

O conjunto de dados constituem a instância numérica, destas soluções, em BIM qualificadas pelos parâmetros de projeto representativos dos grupos G2, G3 e G4: orientação solar para espaço externo (*105-south facing outdoors*), gradiente de intimidade (*127-intimacy gradient*) e zonas de piso(*233-floor surface*).

Estes dados foram extraídos dos modelos (Revit) através das rotinas desenvolvidas em VPL (Dynamo) e armazenados em um único banco de dados (Excel).

O Quadro 9 apresenta o resumo dos testes realizados, através dos conceitos de classificação por aprendizado de máquina não supervisionado, *k-means* e *hierárquica*, apresentado na seção 2.5.

Quadro 9. Resumo dos experimentos

Número do Teste	Origem dos Dados	tipo de Normalização	PCA (variância)	Clusterização		k (nº de clusters)
Teste 1		Planilha inteira (df)	não	não	k-Means	4
Teste 2		Planilha inteira (df)	padrão	não	não	não
Teste 3		Planilha das médias (df6_tr)	padrão	não	não	não
Teste 4		Planilha das médias (df9)	logaritmo	não	k-Means	4
Teste 5		Planilha inteira (df14)	padrão - Excel	não	não	não
Teste 6		Planilha inteira (df13)	logaritmo	não	k-Means	2
Teste 7		Planilha das médias (df12)	padrão - Excel	não	não	não
Teste 8		Planilha das médias (df11)	logaritmo	não	k-Means	2
Teste 9		Distância ('Sala-Dorm1', 'Sala-Dorm2', 'Sala-Banho', 'Sala-Coz/AS')	padrão	não	k-Means	2
Teste 10		Distância ('Sala-Dorm1', 'Sala-Dorm2', 'Sala-Banho', 'Sala-Coz/AS')	padrão	90,50%	k-Means	2
Teste 11		Piso ('Room1', 'Room2', 'Room3', 'Room4', 'Room5')	padrão	não	k-Means	8
Teste 12		Distância ('Sala-Dorm1', 'Sala-Dorm2', 'Sala-Banho', 'Sala-Coz/AS')	padrão	não	Hierárquica	3
Teste 13		Planilha inteira (df)	padrão	não	Hierárquica	5

Fonte: Autoria Própria.

Os dados foram inicialmente importados para o GitHub, uma plataforma de hospedagem do código-fonte que permite o controle de versão. Os testes foram realizados no Colab através dos algoritmos para classificação: *k-means* e *hierárquica*.

A importação das planilhas no Colab a partir do GitHub, foram realizadas através da ferramenta: *read_excel*, encontrada na biblioteca Pandas. Esta biblioteca é a principal ferramenta em Python para manipulação de grandes conjuntos de dados, possuindo diversas estruturas de dados personalizadas, que possibilitam alta performance no tratamento dos dados (MCKINNEY, 2017).

Ao todo foram realizados treze testes, considerando diferentes análises: dados originais, dados normalizados por meio de média (padrão, realizada no Colab,

padrão-Excel e logarítmica, realizadas no Excel); clusterização realizada pelo *k-means* (associada ao Método de Elbow) ou hierárquica. O detalhamento de cada um dos testes é apresentado na sequência. Exclui-se os testes 5, 7 e 8 por não serem representativos.

O primeiro teste considera todos os dados originais da instância numérica das soluções projetuais, sem nenhum tipo de normalização e sem análise de variância (PCA). Através da Figura 45 pode-se observar que a clusterização pelo algoritmo *k-means* foi possível, originando 4 clusters bem definidos pelas orientações (0, 90, 180 e 270).

Figura 45. Clusterização no Teste 1 sobre a amostra total sem normalização e sem análise de variância

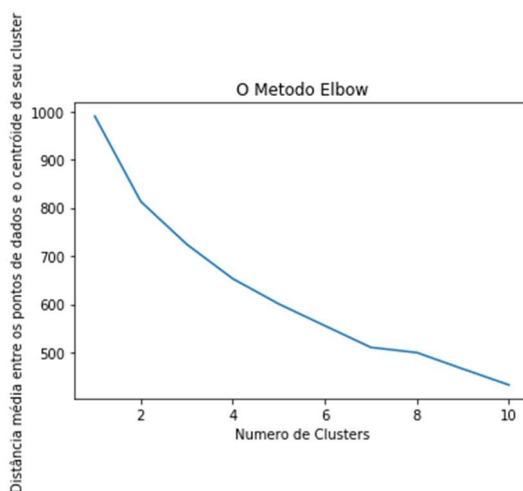
	Sala-Dorm1	Sala-Dorm2	Sala-Banho	Sala-Coz/AS	Room1	Room2	Room3	Room4	Room5	Esp. Externo
Clus_lm										
0	3.862205	4.229153	6.134822	5.263368	1	2	2	2	2	180
1	3.662052	3.568009	4.466689	3.572862	1	2	1	1	2	90
2	3.997743	4.269967	4.923800	4.215657	2	2	2	2	2	270
3	3.409202	3.086358	5.310936	5.120044	1	2	2	2	2	0

Fonte: Autoria Própria.

Nota-se nesta situação que atributos associados aos parâmetros de projeto: orientação solar para espaço externo (*105-south facing outdoors*), gradiente de intimidade (*127-intimacy gradient*) e zonas de piso (*233-floor surface*) não apresentaram diferenciação numéricas suficientemente capazes de permitir outro tipo de agrupamento. Este fato pode estar relacionado, à forma de agrupamento dos valores de *k*, por ser a distância média entre os pontos de dados e o centróide de seu cluster, os valores bem definidos das orientações podem ter influenciado diretamente a clusterização.

No segundo teste, aplica-se a normalização padrão, entretanto o Método de *Elbow* não apresentou nenhum cotovelo que permitisse a clusterização pelo algoritmo *k-means* (Figura 46).

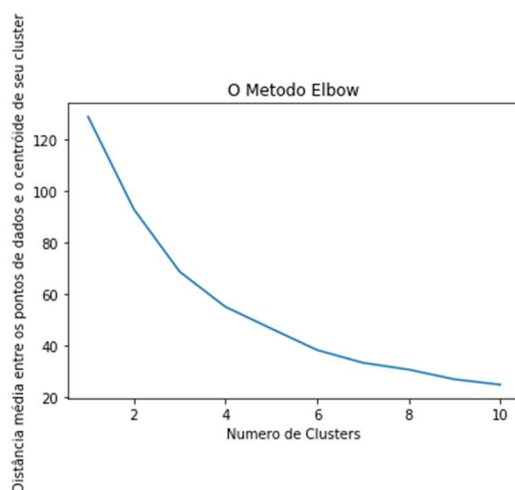
Figura 46. Curva do método Elbow para o Teste 2 com a amostra total normalizada



Fonte: Autoria Própria.

O terceiro teste considera as médias dos atributos originais, pelos grupos G2, G3 e G4, das soluções projetuais, com a aplicação da normalização padrão e sem análise de variância (PCA). Através da Figura 47, pode-se observar que a clusterização não foi possível, uma vez que não houve determinação do número de clusters pelo Método de Elbow.

Figura 47. Curva do Método Elbow para o Teste 3 com a amostra total agrupando atributos por grupo



Fonte: Autoria Própria.

O quarto teste, Figura 48, considera também as médias dos atributos originais, entretanto, opta-se pela aplicação da normalização através de logaritmo. O que viabiliza a clusterização, em quatro clusters, porém, também determinados pelas orientações (0, 0.477121, 0.301030 e 0.602060).

Figura 48. Clusterização resultante do Teste 4 com os parâmetros de projeto representados pela média de seus atributos e normalização algorítmica

	Mdist	Mdure	OR
Clus_lm			
0	0.626508	0.255273	0.000000
1	0.687742	0.255273	0.477121
2	0.581768	0.146128	0.301030
3	0.638668	0.301030	0.602060

Fonte: Autoria Própria.

O sexto teste, cuja normalização foi realizada através de logaritmo, considera todos os atributos originais por *pattern*, não mais a média, como apresenta o quarto teste. Nesta tentativa a clusterização apresenta dois clusters bem definidos, também definidos pela orientação: Cluster 0 = orientação 0; Cluster 1 = orientação >0 (Figura 49).

Figura 49. Clusterização resultante do teste 6 com a amostra original normalizada algoritmicamente

	GRAD-INT_d1	GRAD-INT_d2	GRAD-INT_d3	GRAD-INT_d4	DENS-PISO_c1	DENS-PISO_c2	DENS-PISO_c3	DENS-PISO_c4	DENS-PISO_c5	ORIENTA
Clus_lm										
0	0.556906	0.562935	0.697386	0.631715	0.215021	0.243691	0.200687	0.272360	0.272360	0.000000
1	0.558174	0.566929	0.689152	0.608898	0.200687	0.223843	0.239280	0.235421	0.277874	2.215884

Fonte: Autoria Própria.

Como até este momento todas as formas de classificação vincularam-se a orientação (Grupo 2) fez-se necessário analisar, individualmente, os outros dois grupos: Grupo 3 (gradiente de intimidade) e Grupo 4 (zonas de pisos). Os testes a seguir mantiveram a normalização padrão.

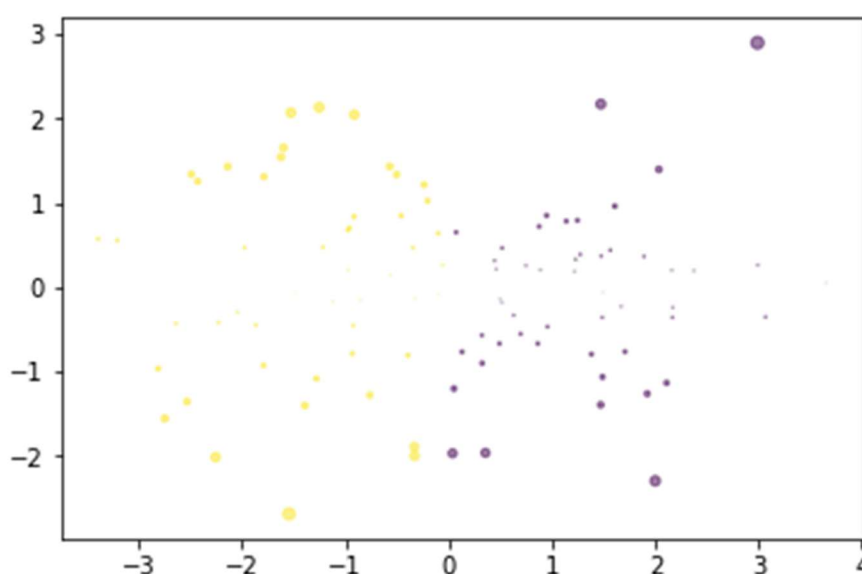
O nono e o décimo testes foram aplicados considerando o Grupo 3, ou seja, os vetores de distância que definem o grau de intimidade das soluções projetuais. Nos dois foi possível a identificação de dois clusters (Figura 50 e 51). Os dados do cluster 0 revelam um padrão, de vetores menores, indicando soluções com grau de intimidade maior em contraposição às soluções projetuais que compreendem o universo do cluster 1.

Figura 50. Clusterização resultante do Teste 9 com a amostra reduzida aos atributos do pattern de grau de intimidade

	Sala-Dorm1	Sala-Dorm2	Sala-Banho	Sala-Coz/AS
Clus_lm				
0	2.755045	3.356434	4.551750	4.008345
1	3.409202	3.086358	5.310936	5.120044

Fonte: Autoria Própria.

Figura 51. Teste 10



Fonte: Autoria Própria.

O Grupo 4 (zonas de pisos) foi analisado através do teste 11. Nele foram identificados oito clusters distintos definidos de acordo com o padrão de posição dos números 1 e 2, ou seja de acordo com a resistência de cada piso, macio ou resistente, respectivamente (Figura 52). Este cenário nos permite um *feedback* rápido das opções que atendem ou não as premissas iniciais do projeto, uma vez que todas as soluções projetuais que atendem ao parâmetro de projeto zona de pisos incluem-se dentro do universo do cluster 0.

Figura 52. Clusterização resultante do Teste 11 com a amostra reduzida para os atributos do pattern de dureza de materiais nas zonas de piso

	Room1	Room2	Room3	Room4	Room5
Clus_lm					
0	1	2	1	1	2
1	2	2	2	2	2
2	2	2	1	1	2
3	1	2	2	2	2
4	2	1	2	2	2
5	2	2	1	2	2
6	1	1	2	2	2
7	2	2	2	2	1

Fonte: Autoria Própria.

Na tentativa de obter novos insights vinculados ao auxílio de tomada de decisão projetual optou-se por aplicar outra ferramenta de classificação: a clusterização hierárquica (testes 12 e 13).

Esta é uma abordagem de classificação em que cada elemento (padrão, casa) é visto como um cluster por si só no início do processo (leitura da imagem da esquerda para a direita). A partir de então os clusters começam a se aglomerar sequencialmente em clusters maiores até que todos formem um só cluster (final do diagrama, em azul, à direita). Este tipo de classificação segue a lógica de agrupamento por distâncias. No caso desta pesquisa, o código, considera a distância euclidiana para medir o valor entre clusters, destacado em vermelho no código apresentado no Quadro 10.

Quadro 10 Código de classificação hierárquica

```
import scipy
leng = featureset_mtx.shape[0]
D = scipy.zeros([leng,leng])
for i in range(leng):
    for j in range(leng):
        D[i,j] = scipy.spatial.distance.euclidean(featureset_mtx[i],
        featureset_mtx[j])
```

D, é a variável que armazena os valores de distâncias entre os padrões (cada solução projetual). A distância é dada entre cada uma das soluções, um *loop*, que mede a distância da solução 1 para as outras 98, solução 2 para as 98 restantes incluindo a 1, até que percorra todas as 99 opções. Pode-se compreender melhor este conceito através da caracterização do teste 12.

O teste 12 considera apenas os quatro atributos, referentes ao *pattern* gradiente de intimidade. Pode-se imaginar cada atributo carregado pela variável `featureset_mtx` como as coordenadas de um vetor no espaço, neste caso 4d, onde `featureset_mtx` são os dados da variável `df` que foram normalizados. `df`, por sua vez, é constituída pelos atributos: 'Sala-Dorm1', 'Sala-Dorm2', 'Sala-Banho', 'Sala-Coz/AS', ou seja, `featureset_mtx` é o conjunto de atributos normalizados de cada solução projetual. Sendo 4 atributos, considera-se 4 coordenadas para cada solução proposta. Desta forma, o que o algoritmo faz é medir a distância euclidiana entre todos os clusters para definir com quem os clusters devem se agrupar. Torna-se importante, neste momento, aplicar um algoritmo para definir a distância de agrupamento entre os clusters, visto que os clusters possuem mais de um elemento.

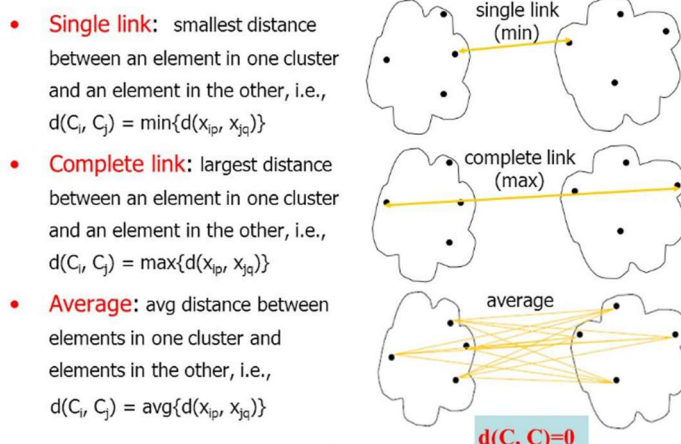
Nesta pesquisa, opta-se pelo o método 'complete link' (Fig. 53) que usa o algoritmo do ponto de maior distância ou algoritmo Voor Hees⁴, destacado em vermelho no código abaixo, Quadro 11, este módulo *scipy* oferece oito opções para calcular a distância, a distância entre pontos mais próximos dos dois clusters, a distância máxima, a média, mediana, entre outras.

Quadro 11. Código de classificação hierárquica associado ao algoritmo Voor Hees

```
import scipy
leng = featureset_mtx.shape[0]
D = scipy.zeros([leng,leng])
for i in range(leng):
    for j in range(leng):
        D[i,j] = scipy.spatial.distance.euclidean(featureset_mtx[i],
featureset_mtx[j])
print('Valor máximo de distância entre casas = ', np.amax(D))
print('Quais são as casas com este valor: \n', np.where(D==np.amax(D)) )
```

⁴Fonte: <https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/generated/scipy.cluster.hierarchy.linkage.html>.

Figura 53. Cluster: medida de distância

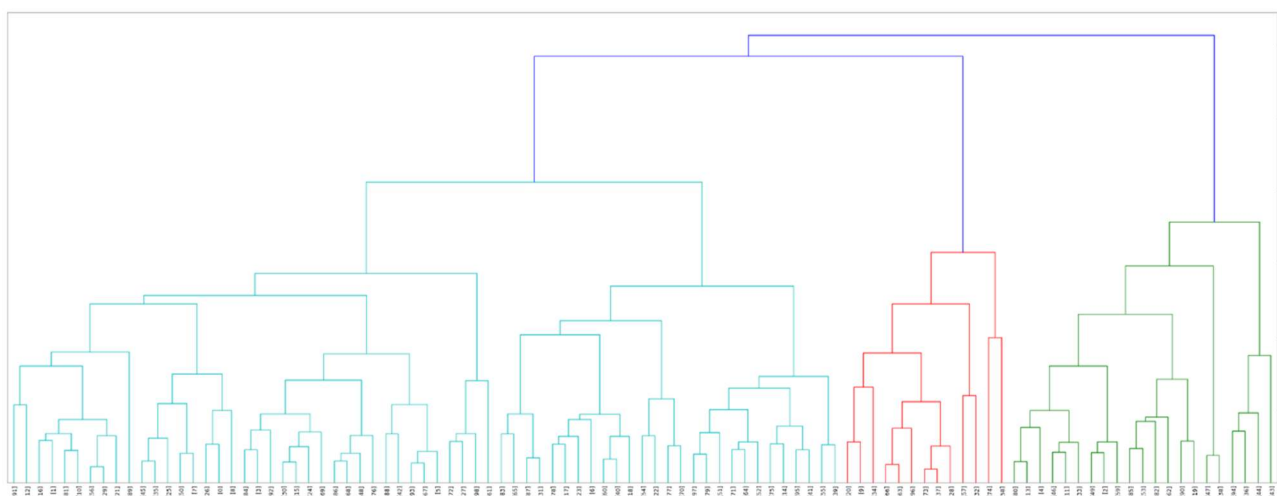


Fonte: CHEN, K. Hierarchical Clustering. COMP Machine Learning. The University of Manchester. (disponível: <https://slideplayer.com/slide/7602875/>)

Os resultados do teste 12, apresentados através do dendograma abaixo (Fig.54), indicam 3 clusters definidos pelas dimensões mais próximas, ou seja, estão diretamente relacionados à composição formal das soluções projetuais que são analisadas. Desta forma, se a distância entre cômodos for similar, as soluções projetuais são do mesmo cluster-grupo, logo a clusterização tende a agrupar por tipologia (Figura 55). Desta forma, a clusterização hierárquica apresenta um agrupamento tipológico.

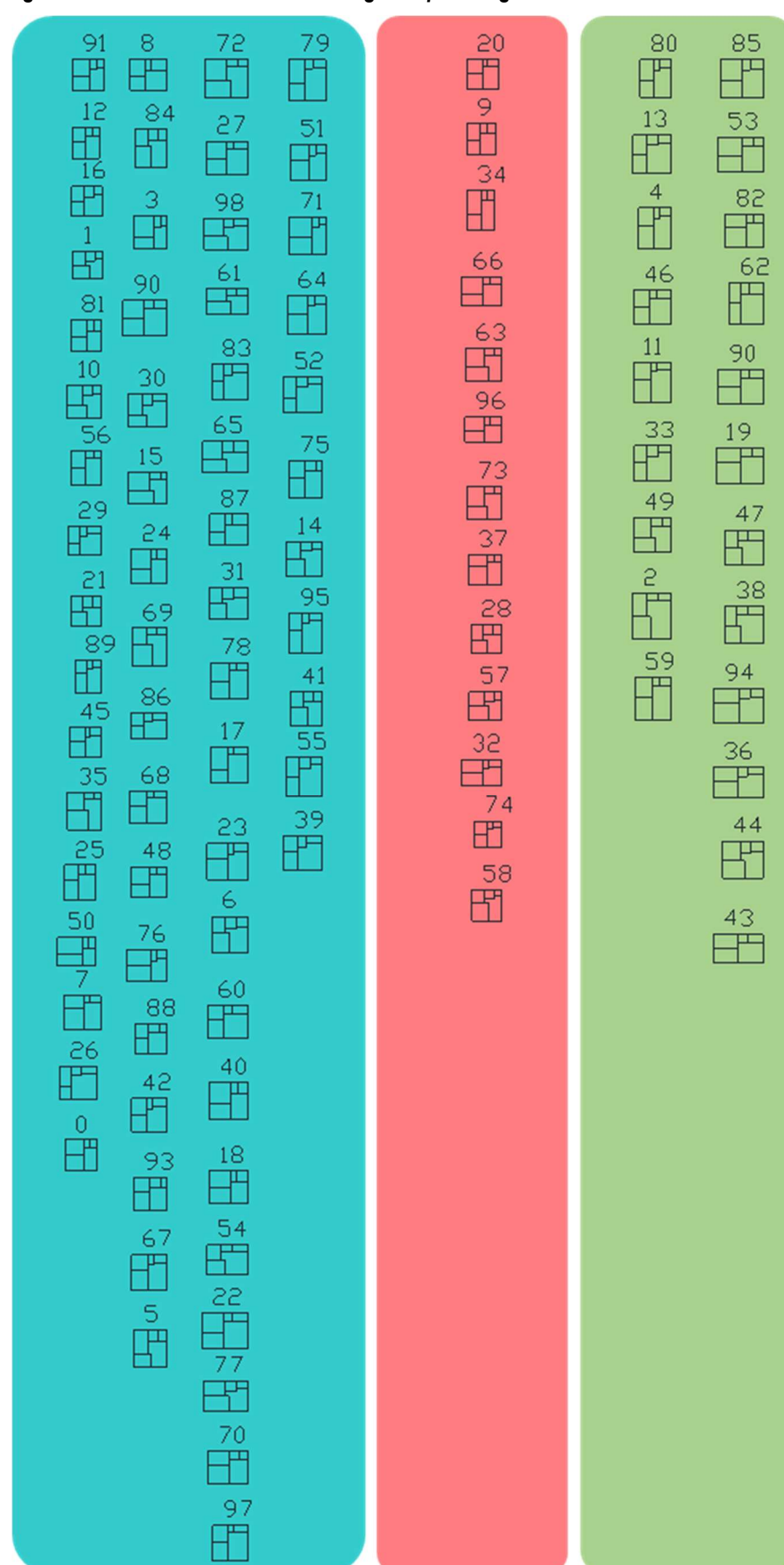
Observa-se através da Figura 55 que os agrupamentos das múltiplas soluções projetuais advindas da GF mantém a variabilidade das soluções classificando-as em grupos com semântica semelhante.

Figura 54. Teste 12: dendograma *pattern* gradiente de intimidade



Fonte: Autoria Própria.

Figura 55. Teste 12: Clusters do dendograma *pattern* gradiente de intimidade



Fonte: Autoria Própria.

Pode-se observar (Fig. 54 e 55) que as soluções agrupadas em cada cluster, representados nas imagens [] pelas mesmas cores, quando considerado apenas o parâmetro de projeto gradiente de intimidade, apresentam características semelhantes quanto aos vetores que definem este atributo. Possibilitando, neste caso, um agrupamento que permite auxiliar a tomada de decisão. Ademais, as soluções cujos grupos são formados mais próximos aos atributos individuais, ou seja, menores valores em “y”, apresentam características mais semelhantes e desta forma, poder-se-ia optar por uma dentre elas.

Por fim, realizamos o teste 13, nele são novamente considerados todos os atributos referentes aos parâmetros de projeto representativos de cada grupo, G2, G3 e G4, orientação solar para espaço externo (*105-south facing outdoors*), gradiente de intimidade (*127-intimacy gradient*) e zonas de piso (*233-floor surface*). Desta vez, a classificação hierárquica, considera 10 atributos, portanto 10 coordenadas para cada solução proposta. O resultado apresentado por esta simulação (Fig.54) apresentou uma nova clusterização, onde foram gerados 5 clusters. Ao compararmos os resultados apresentados à simulação anterior, percebe-se que os grupos não foram mantidos. Deste modo, é possível deduzir que os outros atributos apresentaram maior relevância numérica do que os valores apresentados pelos vetores do gradiente de intimidade.

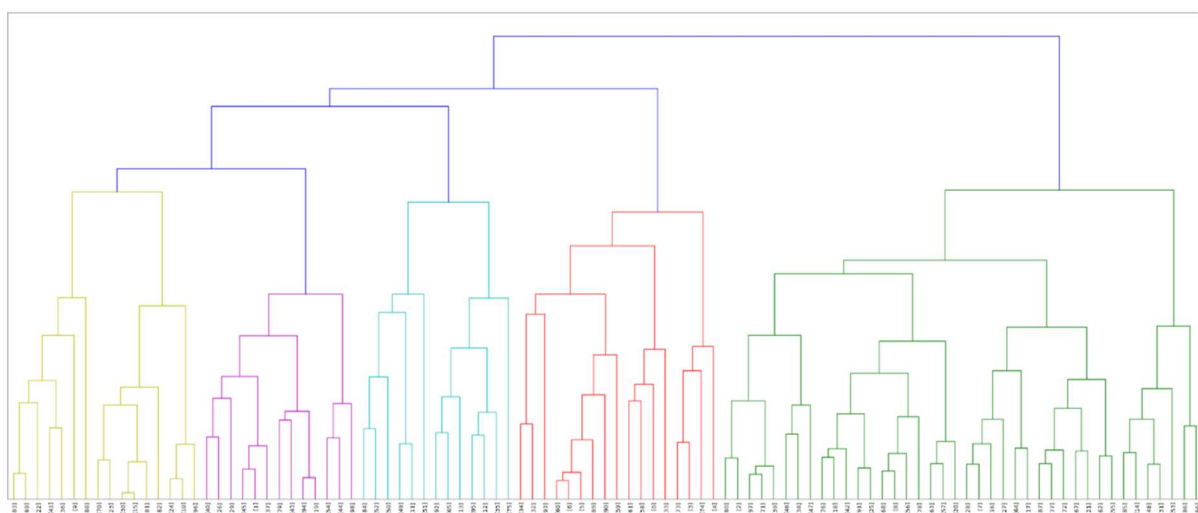
A análise do teste 13, organizando os atributos de acordo com o resultado apresentado pelo dendograma (Fig. 56), possibilitou verificar a hierarquização adotada na composição dos agrupamentos. Primeiro, considera-se a orientação (agrupamentos realizados em $x < 2$), posteriormente a dureza dos pisos (agrupamentos iniciais, realizados em y) e por fim, os vetores de distância que compõe o gradiente de intimidade.

Estes resultados nos levam a confirmar os testes realizados pela classificação através do *k-means*, onde os agrupamentos também foram realizados priorizando a sequência: orientação e dureza dos pisos. Indica ainda, que ao considerar apenas os atributos de um parâmetro de projeto, no caso o gradiente de intimidade (teste 12), a classificação é feita por agrupamento tipológico, ou seja, neste caso de acordo com a

proximidade entre os valores de distância dos vetores, o que não se repete no teste 13 pela variação dos valores.

Inferese assim que existe a possibilidade de classificação das soluções projetuais no auxílio à tomada de decisão, entretanto, é necessário coordenar não apenas os dados de entrada, como também as saídas, para que a análise possa ser validada e interpretada. Ou seja, precisamos entender tanto o que queremos que seja analisado através do suporte que a IA pode nos oferecer, como também entender como os dados são processados, quais os critérios que levaram à escolha para, quando necessário, justificar a tomada de decisão.

Figura 56. Teste 13: dendograma 3 *parâmetros de projeto* (G2, G3 e G4)



Fonte: Autoria Própria.

Figura 57. Teste 13: dados organizados como o dendograma 3 parâmetros de projeto (G2, G3 e G4)

83	3,290603	3,951759	5,18529	4,569271	1	2	1	2	2	90
69	3,207214	3,83095	4,741136	4,089937	1	2	1	2	2	90
22	3,935473	4,073798	5,50151	5,166895	1	2	1	2	2	0
41	3,784194	4,108543	5,093204	3,380291	1	2	1	2	2	180
36	3,72349	3,913292	6,223779	5,486168	1	2	1	2	2	180
9	2,91462	2,996779	3,83594	3,388454	1	2	1	2	2	0
88	3,662052	3,568009	4,466689	3,572862	1	2	1	1	2	90
70	3,795474	3,73968	5,687856	4,893723	2	2	1	2	2	90
23	3,91727	3,577308	4,730299	4,493575	2	2	1	2	2	90
30	3,35526	3,434385	4,969876	4,305383	2	2	1	2	2	0
15	3,357378	3,328694	4,987968	4,136138	2	2	1	2	1	0
81	3,616275	3,53547	4,12182	3,730092	2	2	1	2	2	0
82	3,985745	4,260566	6,067573	4,606845	2	2	1	2	2	0
24	3,381723	3,553424	4,681638	4,243921	2	2	1	2	2	270
10	3,546687	3,393847	4,265494	3,919703	2	2	1	2	2	270
96	2,755045	3,356434	4,55175	4,008345	2	2	1	2	2	270
40	3,827786	3,920282	5,057471	4,260815	1	2	2	2	2	180
26	3,255921	3,455551	4,575028	4,243921	1	2	2	2	2	180
29	3,437896	3,361766	4,238285	3,782296	1	2	2	2	2	270
45	3,115737	3,433451	4,445755	3,812353	1	2	2	2	2	90
1	3,499036	3,456971	4,760983	3,280762	1	2	2	2	2	90
37	3,068204	3,00139	4,358859	3,71572	1	2	2	2	2	90
79	4,153288	4,192736	4,731767	4,379287	1	2	2	2	2	270
43	3,362808	3,636798	6,03876	5,677734	1	2	2	2	2	270
94	3,862205	4,229153	6,134822	5,263368	1	2	2	2	2	180
19	4,193238	4,2311	6,120607	5,224611	1	2	2	2	1	180
54	3,824175	4,172368	5,776571	4,241596	1	2	2	2	2	0
44	3,828196	4,108543	6,686496	5,071872	1	2	2	2	2	0
98	3,409202	3,086358	5,310936	5,120044	1	2	2	2	2	0
84	3,371587	3,624195	4,574033	3,859296	2	1	1	2	2	180
52	4,085799	3,727236	5,125546	4,603123	2	1	1	2	2	90
50	3,034457	3,108725	4,578354	4,361335	2	1	1	2	2	0
49	4,64708	4,461998	5,743671	4,007683	2	1	1	2	2	180
11	4,670806	4,269967	5,091481	3,979617	2	1	1	2	2	270
51	3,96417	4,244958	5,284306	4,174929	1	1	1	2	2	90
92	3,607717	3,402929	4,880187	4,093244	1	1	2	2	2	0
65	3,30691	3,837339	5,617059	4,721173	1	1	2	2	2	90
13	4,63746	4,888213	4,93645	3,693816	1	1	2	2	2	90
95	3,934413	3,876821	5,076324	3,551302	1	1	2	2	2	270
12	3,411165	3,345721	4,312281	2,817478	1	1	2	2	2	270
35	3,189225	3,299952	4,349612	4,105532	1	1	2	2	2	180
75	4,13206	4,032874	4,97162	3,599798	1	1	2	1	2	90
34	3,239679	3,234914	3,420634	4,070606	2	2	2	1	2	0
32	2,554944	2,684472	4,883397	4,612939	2	2	2	1	2	90
93	3,761211	3,625132	4,45732	4,035901	2	2	1	1	2	180
60	3,791887	3,97215	4,942571	4,029785	2	2	2	1	2	270
6	3,613043	3,845844	5,158045	3,534075	2	2	2	1	2	270
5	3,596938	3,717833	4,616521	3,999204	2	2	2	1	2	270
89	3,677078	3,816605	4,101144	2,756501	2	2	2	1	2	270
90	4,248714	4,401617	5,751819	5,083661	2	2	2	1	2	270
59	4,574884	4,565968	5,345825	4,043252	2	2	2	1	2	90
61	2,819538	3,395202	5,467281	4,695475	1	2	2	1	2	270
58	3,583744	3,093425	4,245734	1,5451	1	2	2	1	2	180
0	3,332611	3,440228	4,563826	3,73667	1	2	2	1	1	90
33	4,441384	4,457561	5,254814	4,010343	1	2	2	1	2	270
73	3,112597	2,98927	4,187182	3,932681	2	1	2	1	2	180
3	3,556569	3,545169	4,590821	3,924914	2	1	2	1	2	180
74	2,766784	2,611116	3,874208	3,195471	2	1	2	1	2	90
4	4,630195	4,145273	4,771007	3,586845	2	1	2	1	1	0
80	4,643237	4,404468	4,737716	3,689521	2	2	2	2	2	270
2	4,555447	4,788018	5,346309	4,23627	2	2	2	2	2	270
97	3,997743	4,269967	4,9238	4,215657	2	2	2	2	2	270
71	4,261844	3,756063	5,120225	4,471091	2	2	2	2	2	270
39	4,422895	3,875562	4,846713	3,74207	2	2	2	2	2	270
46	4,438313	4,591414	4,92583	3,943452	2	2	2	2	2	90
38	4,390712	4,859071	6,059885	4,473001	2	2	2	2	2	90
47	4,452883	4,972084	5,9517	4,630072	2	2	2	2	2	180
76	3,392415	3,411745	5,195145	4,681804	2	2	2	2	2	270
18	3,688889	3,785879	5,087452	4,290095	2	2	2	2	1	270
42	3,920282	3,354961	4,367857	3,839982	2	2	2	2	2	270
91	3,635636	2,891028	4,084022	4,277528	2	2	2	2	2	270
25	3,24489	3,281842	4,221961	3,574958	2	2	2	2	2	270
68	3,292314	3,545872	4,92477	4,538663	2	2	2	2	2	180
8	3,014571	3,579051	4,836267	4,150987	2	2	2	2	2	180
56	3,350841	4,433963	4,188495	3,709963	2	2	2	2	2	180
78	3,920428	3,884271	4,593915	4,113071	2	2	2	2	2	180
63	2,809314	2,944768	4,453256	4,185747	2	2	2	2	2	180
57	2,639244	3,086358	5,329463	3,923223	2	2	2	2	2	180
20	2,762821	2,863539	3,877425	3,691671	2	2	2	2	1	180
28	2,9836	3,352232	4,103808	3,582229	2	2	2	2	2	90
7	3,056293	3,235013	4,623679	4,197023	2	2	2	2	2	90
16	3,652099	3,109973	4,679633	3,595749	2	2	2	2	1	90
27	3,10911	3,595675	5,364228	5,152689	2	2	2	2	2	90
64	4,15263	3,69686	5,447347	4,506464	2	2	2	2	2	90
17	3,707671	3,95643	4,536339	4,325269	2	2	2	2	1	90
87	3,494844	4,192284	5,273112	4,540898	2	2	2	2	2	0
77	3,725731	3,673221	5,922674	4,958472	2	2	2	2	2	0
72	3,401108	3,458248	5,092644	5,368417	2	2	2	2	2	0
67	3,709728	3,575946	4,578354	4,121908	2	2	2	2	2	0
21	3,338498	3,48485	4,468727	3,138743	2	2	2	2	2	0
62	4,100453	4,546562	5,447347	4,398265	2	2	2	2	2	0
55	4,378131	3,843683	5,081929	4,090031	2	2	2	2	2	0
85	4,084724	4,260566	5,638954	4,79212	2	1	2	2	2	180
14	4,101921	3,859938	4,978274	3,893776	2	1	2	2	2	180
48	3,304086	3,582571	5,236646	4,303168	2	1	2	2	2	180
31	3,445719	4,059506	5,440054	4,629899	2	1	2	2	2	180
53	4,244958	3,994924	5,476977	4,991472	2	1	2	2	2	270
86	3,296746	3,624195	5,009971	4,258428	2	1	2	2	2	0
66	2,889881	2,913314	4,53023	4,313743	2	1	2	2	2	90

Fonte: Autoria Própria.

A realização dos testes permitiu identificar que AM pode auxiliar na categorização dos atributos de projeto. Entretanto, há a necessidade de melhor compreensão da escolha da ferramenta adequada para esta análise bem como o enriquecimento adequado à avaliação que se almeja.

Dentre as limitações dos testes apresentados, pode-se considerar a baixa qualidade da amostra, devido à sua quantidade reduzida de apenas quatro parâmetros de projeto, como a mais significativa. Poderá ser ampliada para todo o universo dos parâmetros de projeto automatizáveis que permitiram transpor a informação qualitativa para representação matemática. Desta forma, seria possível estudar a clusterização e hierarquização entre eles, promovendo uma sistematização mais robusta e eficiente dos artefatos.

A implementação dos parâmetros de projeto, neste trabalho, foi realizada através da combinação entre ferramentas de autoria BIM, programação visual e o editor de planilhas Excel. Entretanto, sugere-se também que possa ser feito através da associação de propriedades, as quais estejam associadas diretamente ao algoritmo, ou seja, como valores resultantes do cálculo e não através da leitura de valores atribuídos, incorporando, assim, os parâmetros de projeto diretamente ao modelo BIM como uma propriedade do componente. Isto permitirá a extração automática destes atributos agregados a outros aspectos do modelo, possibilitando novas análises em AM.

Os métodos, modelos e constructos desenvolvidos nesta pesquisa permitirão análises similares sobre bairros, a conceber ou existentes, e talvez a comprovação ou não das características humanas e sociais estabelecidas por Alexander ou outros pesquisadores voltados à qualidade ambiental, uma vez que o enriquecimento semântico em BIM associado à AM pode servir como forma de testar e indicar se são metodologias práticas de projeto, como sugerem Daves e Ostwald (2017), tanto para a Avaliação Pré-Construção como para Avaliação Pós-Ocupação.

7. REFLEXÃO SOBRE A APLICABILIDADE

O procedimento de operacionalização da aplicação de parâmetros de projeto em modelos BIM para a avaliação das derivações apresentadas por sistemas generativos, proposto nesta pesquisa, é baseado na aplicação de métodos desenvolvidos a partir de modelos teóricos identificados na literatura: Godoi (2018); Solihin e Eastman (2015); Chen *et al.* (2011), Seghier *et al.* (2017) e por Raschka e Mirjalili (2017).

A formulação da solução no primeiro momento, permitiu **identificar os parâmetros de projeto aplicáveis à algoritmização**. A partir da revisão bibliográfica foram identificados 74 parâmetros de projeto para esta avaliação. Destes, foram selecionados 35 algoritmos, dentro os 41 que se são aplicáveis a modelos BIM e seus componentes em LOD 200. Durante esta formulação, observou-se que um fator complicador pode ser a diversidade de possibilidade de programação dos algoritmos que representam cada parâmetro de projeto. No entanto, a contribuição do procedimento de algoritmização de dados da relação ser humano-ambiente para sustentar soluções projetuais, buscando ligar, de forma sistemática, o comportamento humano a elementos arquitetônicos, demonstrou ser útil na tomada de decisão de projeto entre alternativas, apresentando-se assim como um importante campo a ser explorado.

Ao analisar esta etapa infere-se que o grande volume de algoritmos criados a partir de desempenhos que se aproximem mais de dados quantitativos, como por exemplo, o desempenho luminoso, acústico, térmico entre outros, ocorre justamente por não apresentarem o fator subjetividade e estabelecerem relações mais objetivas e diretas de programação do cálculo associado. Entretanto, parte-se da ideia de que uma solução de projeto é composta pela integração requisitos, portanto, não podemos deixar de considerar os aspectos qualitativos além dos quantitativos.

Neste sentido, a identificação dos parâmetros e algoritmos associados à relação ser humano-ambiente nos permitirá sínteses e avaliações mais dinâmicas, capazes de

retroalimentar o processo de projeto orientando-o às decisões mais qualificadas para a solução de problemas sem que, no entanto, esta desconsidere tais relações.

Apesar das limitações e dificuldades esta etapa demonstrou ser possível atribuir informações não geométricas ao modelo ainda na etapa de concepção, reforçando a capacidade de BIM em coletar todas as informações relevantes disponíveis e organizá-las coerentemente, mesmo na ausência de geometria (KOUTAMANIS, 2017), através de Enriquecimento Semântico (BELSKY *et al*, 2016) para auxiliar na avaliação dos impactos e a possibilidade da edificação em atingir seus objetivos práticos e sociais durante a etapa de Avaliação Pré-Construção (APC).

O **processo de algoritmização**, abre caminho para a elaboração de algoritmos voltados não apenas à HIS, como também a outras tipologias de edifício, a partir de dados que podem ser comparados e verificados entre as publicações como as de: Alexander, *et al* (1977); Barros (2008); Oliveira e Sousa e Moreira (2013); Te Brömmelstroet, *et al* (2018); Wang *et al*, (2018); e, Allam, (2019). Ademais, permite que processos participativos possam servir de estruturas iniciais ao desenvolvimento de novos algoritmos.

A **associação do Modelo de Informação ao algoritmo**, permitiu não apenas a **transcrição em BIM da geometria** resultante de sistemas generativos, bem como, sua **associação ao sistema de classificação BIM**, exemplificado na seção 5.3 através do parâmetro de projeto Zona de Pisos (Fig.39), fundamental por contribuir em diversas áreas e etapas do processo de projeto garantindo assertividade e interoperabilidade. Permitindo assim, a associação de dois aspectos do Projeto Arquitetônico Assistido por Computador, a geração algorítmica de projetos e a modelagem da informação, como também foi incentivado por Veloso *et al*. (2018).

A criação dessas rotinas apresenta vantagens ao incentivar e favorecer a avaliação das derivações apresentadas por sistemas generativos em ferramentas de autoria, estruturando as informações desde o início do modelo, fundamentado as decisões através do resultado das reflexões e análises dos dados gerados, auxiliando assim a tomada de decisão e as diferentes abordagens da avaliação de projetos.

A aplicação das rotinas demonstrou, apesar das limitações e restrição do universo do projeto de HIS, a possibilidade de estabelecer um processo no qual conjunto de rotinas poderão ser aplicadas de forma automatizada sobre inúmeros modelos de informação, gerados pelo computador, objetivando auxiliar o projetista a escolher o melhor resultado através da sobreposição dos indicadores de parâmetros de projeto aplicáveis à algoritmização. Entretanto, deve-se definir a melhor maneira de implementação de cada uma das rotinas, uma vez que o nível de detalhamento tem influência direta no indicador, quando calculado em BIM, bem como o enriquecimento semântico necessário ao modelo.

Desta forma, como os dados de entrada possuem relação direta ao nível de precisão das avaliações, sugere-se que os sistemas generativos possam ser aplicados já em ferramentas que permitem BIM.

A formulação da solução **suporte à tomada de decisão projetual**, permitiu explorar algoritmos classificadores, aproximando BIM à aplicação de IA no auxílio à tomada de decisão projetual ainda na etapa de concepção. Apesar do universo restrito desta pesquisa, esta formulação permite vislumbrar, em breve, a geração e análise de um conjunto cada vez maior de alternativas de projeto, capazes de explorar diferentes funções de valor, ainda em estágios iniciais do projeto arquitetônico. Como também apontam As, *et al*, (2018); Hu (2018) Nisztuk; Myszkowski, (2019) e Sacks *et al*, (2019).

Um fator complicador nesta etapa, foi o peso numérico entre os dados de cada um dos parâmetros de projeto. Uma opção para minimizar a influência destes valores, durante a classificação não supervisionada, poderia ser a criação de sistemas de ponderação além das normalizações aplicadas aos dados. Visto que a redução correta dos dados de entrada influência diretamente nos resultados dos clusters.

A metodologia proposta através da combinação dos artefatos desenvolvidos mostrou-se aplicável e de grande potencial de suporte ao processo de projeto de HIS. Os métodos utilizados para a elaboração desta metodologia podem ser replicados a fim de qualificar outras tipologias de edifício, a fim de melhorar a qualidade final do projeto. Como este não foi o intuito deste trabalho, sugere-se estudos mais aprofundados neste sentido.

Apesar da complexidade da implementação simultânea dos artefatos criados, esta pode contribuir positivamente no desenvolvimento de novos projetos, possibilitando a inserção de dados qualitativos aos modelos de informação, o rápido retorno, auxílio à tomada de decisão na escolha dentre inúmeras derivações dos sistemas generativos e novas alternativas ao processo de projeto mediado pela combinação entre sistemas generativos + modelagem da informação + aprendizado de máquina, na etapa de avaliação de projetos. Sugere-se ainda que melhorias e incrementos devem ser realizados constantemente, adequando o uso ao tipo de projeto.

8. CONTRIBUIÇÕES TEÓRICAS

Resgatar e rediscutir aspectos levantados por movimentos como o *Design Methods* (1960) e o *Design Thinking* (1969) torna-se eminente frente à produção da habitação de interesse social, frequentemente associada à homogeneização das soluções projetuais, replicadas em diferentes estados brasileiros, independente das necessidades locais e dos próprios usuários. Tal prática não tem se mostrado capaz de garantir a qualidade dos projetos, nem de incorporar as reais necessidades dos beneficiários.

Por outro lado, retomar a metodologia ou as soluções propostas por Alexander permite-nos salientar as reflexões e diretrizes atuais de projeto levantadas por pesquisadores da qualidade ambiental, como Barros e Kowaltowski (2013); Oliveira e Sousa e Moreira (2013) e Voordt e Wegen (2013), quanto à relação ambiente-comportamento humano, especialmente no que diz respeito à qualidade e diversidade socioambiental, bem como contribuir nas direções sugeridas por Daves e Ostwald (2017) para o futuro de *A Pattern Language*.

Verifica-se que a combinação dos modelos teóricos identificados na literatura que permitiram a operacionalização da aplicação de parâmetros de projeto em modelos BIM para a avaliação das derivações apresentadas por sistemas generativos, caracterizam-se como uma das contribuições teóricas desta pesquisa.

Os modelos teóricos que contribuíram são: Godoi (2018), para a definição de variáveis que compõem cada algoritmo; a identificação das categorias de automatização, através do modelo apresentado por Solihin e Eastman (2015); o modelo proposto por Chen *et al.* (2011), que incorpora a associação dos objetos à BIM; o modelo desenvolvido por Seghier *et al.* (2017), para extração automática dos dados do modelo BIM a serem analisados pelo projetista ainda na etapa de concepção; e o modelo para clusterização não supervisionada, através da classificação hierárquica e o *k-means*, aplicando o método de Elbow para a otimização do número de *clusters* apresentado por Raschka e Mirjalili (2017).

Ao modelo de algoritmização descrito por Godoi (2018) foi incorporada a identificação das categorias de automatização, através do modelo apresentado por Solihin e Eastman (2015), e uma posterior, de associação do algoritmo ao BIM, modelo adaptado de Chen *et al.* (2011), que incorpora a associação dos objetos à BIM através da relação dos atributos em três aspectos: (A) classificação do objeto, (B) dados geométricos do objeto e (C) informação da construção.

O fluxo de trabalho proposto por Seghier *et al.* (2017), está inserido nesta pesquisa para a avaliação da aplicação dos parâmetros de projeto. O método baseia-se na integração de Linguagem de Programação Visual (VPL) e BIM. De forma que os dados são extraídos do modelo 3D BIM e gerenciados através das ferramentas Revit, Excel e Dynamo, como propõem-se nesta pesquisa.

Outra contribuição teórica aponta para a necessidade de integrar BIM à IA, para auxiliar a tomada de decisão, na tentativa de demonstrar ordem e padrões onde o projetista não conseguiria sozinho. Em relação aos conceitos descritos por Raschka e Mirjalili (2017), para a aplicação da clusterização para casos de aprendizado não supervisionado, optou-se por duas propostas de classificação: a hierárquica e através do *k-means*.

Constata-se desta forma que esta pesquisa associa tanto os conceitos da terceira geração da arquitetura digital (KALAY, 2004), marcada por retomar sistemas destinados a apoiar o processo de projeto arquitetônico, como os avanços das áreas como Programação Orientada a Objeto (OOP), Inteligência Artificial, sistemas de gerenciamento de banco de dados (DBMS), parametrização; consolidando e viabilizando processos anteriormente teoricamente estabelecidos.

Outra constatação é a validação do modelo composto proposto por Andrade (2012), onde os componentes do processo de projeto aparecem interagindo diretamente com o projetista, que se transforma no elemento central do Projeto Arquitetônico Digital. Nesse modelo o projetista aparece com a posição simbólica central (P). As fases da sequência de decisão - geração (G), avaliação (A) e representação (R) - constituem-se no modelo de projeto digital nos componentes geração, avaliação e representação do projeto digital (ANDRADE, 2012).

9. CONCLUSÃO

Verifica-se através desta pesquisa que a hipótese não foi totalmente confirmada, uma vez que os recursos atuais em BIM não conseguem sozinhos auxiliar o projetista a escolher o melhor resultado dentre as possibilidades geradas pelo computador advindas de um processo generativo de projeto, fez-se necessário aplicar ferramentas de AM e mesmo assim, sem descartar o projetista durante o processo.

A partir dos resultados apresentados verifica-se que o objetivo principal foi alcançado, através dos artefatos criados: um **método** para escolha de parâmetros de projeto aplicáveis à construção de algoritmos para o enriquecimento semântico projetual (Seção 5.1). Outro **método** para algoritmizar parâmetros de projeto (Seção 5.2). Novamente um **método** para associar o Modelo de Informação ao algoritmo (Seção 5.3). Por fim, um **método**, para dar suporte à tomada de decisão projetual (Seção 5.4). Para isto, foram integrados e adaptados modelos teóricos cuja apropriação conjunta efetivou a aplicação desta metodologia.

Percebe-se ainda que os objetivos específicos foram contemplados integralmente ao longo da pesquisa. A metodologia aplicada mostrou-se apropriada por permitir a construção de diversos artefatos bem como discussões teóricas sobre os temas abordados.

A aplicação de parâmetros de projeto em ambiente computacional, ou parâmetros qualitativos, vinculados ao modelo de informação possibilitam a gestão das informações, geométricas ou não, desde o início do processo, promovendo a integração completa do processo de projeto. Estimulando o impacto da tecnologia no subsídio de decisões qualificadas tomadas ainda na fase de concepção.

O Enriquecimento Semântico de BIM é indispensável para a avaliação de projeto seja em relação às especificações do programa de necessidades; do próprio programa de necessidades, das diretrizes de qualidade, com o orçamento, normas e outras exigências; ou ainda, através de relatório ambiental (VOORDT; WEGEN, 2013).

Os artefatos desenvolvidos nesta pesquisa seguem a caracterização proposta por March e Smith (1995). Foram concebidos a partir do potencial identificado após a caracterização do problema e fundamentação teórica quatro métodos que geram: constructos, modelos, métodos e instâncias. Em três momentos da implementação foram aplicadas formas de avaliação distintas sugeridas por Lacerda *et al* (2013): (i) na Escolha dos parâmetros de projeto adota-se a avaliação analítica da categorização de Solihin e Eastman (2015) para a identificação dos parâmetros de projeto automatizáveis; (ii) na Algoritmização de Parâmetros de projeto em BIM adotou-se a experimentação por meio da simulação e comparação na prova de conceito para definição da rotina de automatização e por fim (iii) na Classificação da informação da aplicação dos parâmetros de projeto adotou-se a avaliação descritiva por meio de cenários. Ao contribuir para o avanço da discussão teórica na área de estudo, a metodologia desta pesquisa caracteriza-se como uma das criações típicas da DSR.

No Capítulo Sete encontram-se descritas algumas limitações e dificuldade que foram encontradas na aplicação dos métodos, mas, que não impedem a validação e melhorias que possam incrementar a aplicação da metodologia.

As contribuições teóricas desta pesquisa encontram-se detalhadas no Capítulo Oito, e relacionam-se principalmente ao desenvolvimento de uma metodologia capaz de operacionalizar a aplicação de parâmetros de projeto em modelos BIM para viabilizar a avaliação das derivações apresentadas por sistemas generativos agregando-se ferramentas de AM. A metodologia é a demonstração na prática da descrição teórica da arquitetura digital da terceira geração.

Observa-se nas implementações a capacidade de BIM em lidar também com informações não geométricas durante o processo de projeto, e que há a possibilidade de aplicação prática em projetos de HIS da gestão destas informações para APC. Vislumbra-se ainda que esta metodologia possa ser aplicada também a outras tipologias de edifícios, com adaptação dos parâmetros de projeto a requisitos qualitativos imputados no início do processo de projeto, seja por *design* colaborativo ou programa de necessidades. O gerenciamento destas informações desde o início do projeto, faz com que elas não se percam ao longo do processo, e até mesmo, seja capaz

de serem incorporadas nas edificações como ambientes construídos responsivos ampliando o processo de projeto ao longo do ciclo de vida da edificação.

Os artefatos desenvolvidos auxiliam a aplicação desta metodologia, podendo ser adaptados e reavaliados em outros cenários. Proporcionando assim, oportunidades de otimização e rápido retorno na APC, desde o início do processo. A modelagem de informação voltada a dados não geométricos, além de garantir sua aplicação, auxilia a colaboração e gestão na tomada de decisão entre todos os agentes envolvidos ao longo do processo, sendo eficaz para o entendimento das relações de causa e efeito das decisões tomadas durante o processo de projeto. Ressalta-se que, conforme se afirmou anteriormente, os parâmetros qualitativos possuem tanta importância quanto os quantitativos para a qualidade cada vez mais interativa da edificação.

Nesta pesquisa opou-se pela implantação de parâmetros de projeto representativos de cada um dos grupos, entretanto, discussões sobre cada um dos grupos, ou até mesmo de todos os parâmetros de projeto poderiam enriquecer as análises, principalmente elucidar melhor a necessidade da integração com sistemas de classificação por Aprendizado de Máquina.

Considera-se também como uma limitação, por não ser o objetivo desta pesquisa, a aplicação prática desta metodologia. Sabe-se que o desenvolvimento dos projetos de HIS ainda não incorporaram as explorações digitais, através dos sistemas generativos, para a solução dos projetos.

O cenário ideal seria a possibilidade de aplicação da metodologia, desde a etapa de definição do programa de necessidades até a avaliação pós ocupação através destas novas tecnologias no desenvolvimento de um projeto voltado à moradia de interesse social. Entretanto, a este cenário vinculam-se as maiores dificuldades das pesquisas acadêmicas: acessibilidade aos projetos, tempo para a execução e até mesmo o interesse dos agentes envolvidos na exploração de novas tecnologias.

Contudo, as novas regulamentações que incentivam a aplicação de tecnologias BIM, no maior programa de habitação do país o MCMV, mesmo que objetivem num primeiro momento o gerenciamento de custos e prazos, pode abrir um caminho para a introdução do gerenciamento das informações qualitativas, voltadas às necessidades

dos usuários. Para isto, a necessidade de pesquisas mais detalhadas acerca das moradias faz-se ainda mais necessárias, como sugerem Kowaltowski, D. *et al* (2015 e 2019).

Frente às limitações encontradas ao longo da pesquisa por complexidade do assunto, por limitações de conhecimento da pesquisadora e de limitações temporais, sugere-se que outros trabalhos possam ser desenvolvidos a partir das lacunas encontradas:

- Aprofundar as análises desenvolvidas na inserção de dados qualitativos em Modelos BIM, através do enriquecimento semântico.
- Realizar as análises dos parâmetros de projeto através da associação de propriedades às quais estejam associadas diretamente ao algoritmo, ou seja, como valores resultantes do cálculo e não através da leitura de valores atribuídos;
- Desenvolver a metodologia através da substituição dos parâmetros de projeto por levantamentos de APO, programas de projeto de processos colaborativos de projeto, ou outras entradas que considerem aspectos qualitativos indispensáveis ao gerenciamento das informações do projeto;
- Reaplicar a metodologia para outras tipologias;
- Estimular novos estudos de Aprendizado de Máquina para a identificação das melhores práticas para categorização em ambientes não supervisionados do projeto arquitetônico.
- Associar o aprendizado por reforço ao processo de tomada de decisão;
- Continuar desenvolvendo mecanismos para a inserção de dados qualitativos ao modelo de informação desde as etapas iniciais do projeto arquitetônico;
- Readequar os métodos e instâncias para aprimorar as análises e aplicações em contextos similares;
- Desenvolver análises conjuntas de parâmetros qualitativos e quantitativos;
- Estimular estudos de integração entre de alternativas digitais, consolidadas (CAD, Sistemas Generativos) e promissoras (BIM e Aprendizado de Máquina), para apoiar o desenvolvimento, tomada de decisão e validação de alternativas projetuais.

REFERÊNCIAS

- ACOLIN, Arthur; HOEK-SMIT, Marja C.; ELOY, Claudia Magalhães. High delinquency rates in Brazil's Minha Casa Minha Vida housing program: Possible causes and necessary reforms. **Habitat International**, v. 83, p. 99-110, 2019.
- AGÊNCIA BRASILEIRA DE DESENVOLVIMENTO INDUSTRIAL. **ABDI**. Metodologia BIM pode ser usada no programa “Minha Casa, Minha Vida”. <https://www.abdi.com.br/postagem/metodologia-bim-pode-ser-usada-no-programa-minha-casa-minha-vida> Acesso 02/06/2019.
- ALBERTI, L. B. **Da arte edificatória**. Traduzido por A. .M. E. Santo; introdução e notas por Mário Krüger. Lisboa Fundação Calouste Gulbenkian, 1485/2011.
- ALEXANDER, C. **Notes on the Synthesis of Form**. Harvard University Press, 1964.
- ALEXANDER, C.; ISHIKAWA, S.; SILVERSTEIN, M. **A Pattern Language**. New York: Oxford Univ., 1977.
- ALEXANDER, C., **The Timeless Way of Building**. New York, Oxford University Press, 1979
- ANDRADE, M. **Processo digital de geração da forma baseada no desempenho e com suporte em building information modeling**. Campinas: Faculdade de Engenharia Civil – UNICAMP, 2012. 399 p. Tese (Doutorado) – Faculdade de Engenharia Civil, UNICAMP, 2012.
- ALLAM, Z. Achieving Neuroplasticity in Artificial Neural Networks through Smart Cities. **Smart Cities**, v. 2, n. 2, p. 118-134, 2019.
- ANZALONE, P.; CLARKE, C. Architectural Applications of Complex Adaptive Systems. In: Annual CONFERENCE OF THE ASSOCIATION FOR COMPUTER-AIDED ARCHITECTURAL DESIGN IN ARCHITECTURE, 2003, Indianapolis. **Anais [...]**. Indianapolis: Ball State University, 2003. p.325-335.
- ARAÚJO, André L.; CELANI, Gabriela. Exploring Weaire-Phelan through Cellular Automata: A proposal for a structural variance-producing engine. **Blucher Design Proceedings**, v. 3, n. 1, p. 710-714, 2016.
- ARAÚJO, A. L. **Autômatos celulares: definição e aplicações na arquitetura**. In: CELANI, M. G. C.; SEDREZ, M. (Organizadores). *Arquitetura contemporânea e automação: prática e reflexão*. São Paulo: ProBooks, 2018. p.69 a 84.
- ARGAN, G. C. **Projeto e destino**. São Paulo: Editora Ática, 2000.
- AS, I.; PAL, S.; BASU, P.. Artificial intelligence in architecture: Generating conceptual design via deep learning. **International Journal of Architectural Computing**, v. 16, n. 4, p. 306-327, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. (2012). **NBR 15965**: Um sistema de classificação da informação da construção. Rio de Janeiro: ABNT.
- BARROS, R. R. M. P. **Habitação coletiva**: a inclusão de conceitos humanizadores no processo de projeto. Campinas: Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, UNICAMP, 2008. p.189 Tese (Doutorado).) – Faculdade de Engenharia Civil, UNICAMP, 2008.
- BARROS, R.; KOWALTOWSKI, D. Do projeto urbano ao detalhe construtivo “A Pattern Language” finalmente traduzida. **Resenhas online**, v. 12, p. 137, 2013.

- BELSKY, M.; SACKS, R.; BRILAKIS, I. A Semantic Enrichment Engine for Building Information Modelling. **Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering**, p. 261-274.
- BIANCONI, R. A linguagem matemática. Classnotes, **IME-USP**, 2002. Disponível em: <https://www.ime.usp.br/~bianconi/recursos/lo.pdf>. Acesso em: 18 de mai.de2018.
- BRAUN, A.; BORRMANN, A. Combining inverse photogrammetry and BIM for automated labeling of construction site images for machine learning. **Automation in Construction**, v. 106, p. 102879, 2019.
- BROADBENT, Geoffrey. Alexander's pattern language. **ARCHITECTURAL ASSOCIATION QUARTERLY(U. K.), VOL. 11, NO. 4(1979), P. 58-59. 2 ILLUS.(General)**, 1979.
- BUCKLEY, Robert M.; KALLERGIS, Achilles; WAINER, Laura. The emergence of large-scale housing programs: Beyond a public finance perspective. **Habitat International**, v. 54, p. 199-209, 2016.
- CARDOSO, D. R. **Desenho de uma poiesis**: comunicação de um processo coletivo de criação na arquitetura. São Paulo: Pontifícia Universidade Católica de São Paulo, PUC, 2008. p.109 Tese (Doutorado). – Pontifícia Universidade Católica de São Paulo, 2008.
- CELANI, G.; VAZ, C. E. V. Scripts em CAD e ambientes de programação visual para modelagem paramétrica: uma comparação do ponto de vista pedagógico. **Cadernos do PROARQ (UFRJ)**, v. 1, p. 1-1, 2012.
- CHECCUCCI, E. S.; PEREIRA, A.P.C.; AMORIM, A. L.de. A difusão das tecnologias BIM por pesquisadores do Brasil. **ENCONTRO DE TECNOLOGIA DE INFORMAÇÃO E COMUNICAÇÃO NA CONSTRUÇÃO**, v. 5, 2011.
- CHEN, Chiung-Hui. A pattern-oriented design agent. In: **The 40th International Conference on Computers & Industrial Engineering**. IEEE, 2010. p. 1-5.
- CHEN, Y. J., FENG, C. W., WANG, Y. R., WU, H. M. Using bim model and genetic algorithms to optimize the crew assignment for construction project planning, **International Journal of Technology**, 2, 3, 179-188. 2011.
- COATES, P.; HEALY, N.; LAMB, C.; VOON, W. L.; The use of cellular automata to explore bottom-up architectonic rules. In: Eurographics UK Annual Conference, 14., 1996, London. **Anais [...]** Londres: Imperial College London, 1996. p.1-14.
- CRAFTAI. **The maturity of visual programming**. Disponível em: <<http://www.craft.ai/blog/the-maturity-of-visual-programming/>>. Acesso em: 02/06/19
- DESTRI, L. Minha Casa, Minha Vida na Academia. **Revista Fapesp** n.279 p.83-85, maio/2019.
- DAWES, Michael J.; OSTWALD, Michael J. Christopher Alexander's A Pattern Language: analysing, mapping and classifying the critical response. **City, Territory and Architecture**, v. 4, n. 1, p. 17, 2017.
- DOLLENS, D. **De lo digital a lo analógico**. Editorial Gustavo Gili, 2002.
- EASTMAN, C.; TEICHOLZ, P.; SACKS, R.; LISTON, K. **BIM Handbook**: A guide to Building Information Modeling for owners, managers, designers, engineers, and contractors. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2008. 490 p.
- EISENMAN, P. "Eisenmanesie". **Architecture + Urbanism**. Ed. Extra: 1988. p.70.
- FASOULAKI, E. **Integrated design**: a generative multi-performative design approach. 2008. Dissertação (Mestrado). Massachusetts Institute of Technology MIT, Cambridge.

FORTINO, Andres. A pattern language for innovation management. In: **PICMET'08-2008 Portland International Conference on Management of Engineering & Technology**. IEEE, 2008. p. 415-419.

GODOI, G. Procedimentos algorítmicos: o método albertiano. In: CELANI, M. G. C.; SEDREZ. (Organizadores). **Arquitetura Contemporânea e automação: prática e reflexão**. São Paulo: ProBooks, 2018. p. 29 a 40.

GONÇALVES, P.H. (2018). **Automatização do fluxo de informações dentro do processo BIM com foco na avaliação do desempenho térmico, acústico e o custo das decisões projetuais**. Tese de Doutorado em Estruturas e Construção Civil, Publicação E.TD - 005A/18, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 188p.

GOODFELLOW, I.; BENGIO, Y.; COURVILLE, A. **Deep learning**. MIT press, 2016.

GROAT, L. N.; WANG, D. **Architectural research methods**. 2. Edition ed. New York, USA: Wiley, 2013.

HARRIS, J. **Factal Architecture: organic design philosophy in theory and practice**. New México: University of New Mexico Press, 2012.

HERR, C. M.; KVAN, T. Using cellular automata to generate hogh-density building form. International Conference on Computer-Aided Architectural Design Futures, 11., 2005. Vien. **Anais...** Viena: Vienna University of Technology, 2005. p.249-258.

HERR, C. M.; KVAN, T. Adaptatig cellular automata to support the architectural design process. **Automation in Construction**, v. 16, n.1, p. 61-69, jan. 2007.

HEVNER, A.R.; MARCH, S.T.; PARK, J.; RAM, S. Design science in Information Systems Research. **MIS Quarterly**, v. 28, n. 1, p. 75-105, 2004.

HAYMAKER, J. et al. Design space construction: A framework to support collaborative, parametric decision making. **Journal of Information Technology in Construction**, p. 157-178, 2018.

HONDA, H.; Introdução básica à clusterização. Laboratório de Aprendizado de Máquina em Finanças e Organizações - **LAMFO**, Universidade de Brasília, 2017. (disponível em: https://lamfo-unb.github.io/2017/10/05/Introducao_basica_a_clusterizacao/)

HONDA, H.; FACURE, M.; YAOHAO, P. Os três tipos de aprendizado de máquina. Laboratório de Aprendizado de Máquina em Finanças e Organizações - **LAMFO**, Universidade de Brasília, 2017. (disponível em: <https://lamfo-unb.github.io/2017/07/27/tres-tipos-am/>)

HOLZER, Dominik. Optioneering in collaborative design practice. **International Journal of Architectural Computing**, v. 8, n. 2, p. 165-182, 2010.

HU, Y.; CASTRO-LACOUTURE, D. Clash Relevance Prediction Based on Machine Learning. **Journal of Computing in Civil Engineering**, v. 33, n. 2, p. 04018060, 2018.

HUDSON, R. **Strategies for Parametric Design in Architecture: An application of practice led research**. Thesis (Doctor of Philosophy (PhD)). University of Bath, 2010.

JODIDIO, P. **Architecture now: arquitetura dos nossos dias**. n. 3. Itália: Taschen, 2005.

JONES, J. C. A Method of Systematic Design', in **Conference on design methods**, eds J. C. Jones and D. G. Thornley, The Macmillan Company, New York, 1963.

JONES, J. C. **Design methods: seeds of human futures**, 1970. London and New York: John Wiley (2nd edn, 1992, New York: Van Nostrand Reinhold).

- KALAY, Y. E. **Architecture's New Media: Principles, Theories, and Methods of Computer-Aided Design**. London: MIT Press, 2004. 536p.
- KARAN, E.; ASADI, S. Intelligent designer: A computational approach to automating design of windows in buildings. **Automation in Construction**, v. 102, p. 160-169, 2019.
- KASSEM M., KELLY G, DAWOOD N, *et al.* BIM in facilities management applications: a case study of a large university complex. **Built Environ Proj Asset Manag** 2015; 5: 261-277.
- KOLAREVIC, B. **Architecture in the Digital Age: Design and Manufacturing**. New York and London, Taylor & Francis, 2003.
- KONIS K.; GAMAS A; KENSEK, K. Passive performance and building form: An optimization framework for early-stage design support. **Solar Energy**. Volume 125, February 2016, Pages 161-179.
- KOUTAMANIS, Alexander. Briefing and Building Information Modelling: Potential for integration. **International Journal of Architectural Computing**, v. 15, n. 2, p. 119-133, 2017.
- KOWALTOWSKI, D. C.C.K. et al. Reflexão sobre metodologias de projeto arquitetônico. **Ambiente Construído**, v. 6, n. 2, p. 7-19, 2006.
- KOWALTOWSKI, D., GRANJA, A. D., MOREIRA, D. DE C., PINA, S. M., OLIVA, C. A. E CASTRO, M. R. The brazilian housing program "Minha Casa Minha Vida" – a systematic literature review. **Journal of the Korean Housing Association**. v. 26, n. 6, p. 35-42. on-line. dez. 2015
- KOWALTOWSKI, D., MUIANGA, E., GRANJA, A. D., MOREIRA, D., BERNARDINI, S., CASTRO, M. R. A critical analysis of research of a mass-housing programme. **Building Research & Information**. ISSN: 0961-3218, May, 2018. pp. 01-19.
- KRAWCZYK, R. J. Architectural Interpretation of Cellular Automata. In: Internacional Conference on Generative Art, 4., 2001, Milão. **Anais...** Milão: Poltecnico di Milano, 2001. p.71-78.
- LACERDA, D.P. et al. Design Science Research: método de pesquisa para a Engenharia de Produção. **Gestão de Produção**, v. 20, n 4, p. 741-761, 2013.
- LOVE, T. Annotated bibliography relating to definitions of the term 'design process' 1962-1995. Social, Environmental and Ethical Factors in **Engineering Design Theory: a Post-positivist Approach**, 1997.
- LOVE, P., MATTHEWS J., SIMPSON I., *et al.* A benefits realization management building information modeling framework for asset owners. **Automat Construction** 2014; 37: 1-10.
- LOVE, P. *et al.* BIM in the operations stage: bottlenecks and implications for owners. **Built Environment Project and Asset Management**, 2015.
- LUKKA, K. The constructive research approach. In Ojala, L. & Hilmola, O-P. (eds.) Casestudy research in logistics. **Publications of the Turku School of Economics and Business Administration**, Series B1, p.83-101, 2003.
- MANRIQUE, J. D. *et al.* Automated generation of shop drawings in residential construction. **Automation in Construction**, v. 55, p. 15-24, 2015.
- MARCH, S. T.; SMITH, G. F. Design and natural science research in Information Technology. **Decision Support Systems**, v. 15, p. 251-266, 1995. [http://dx.doi.org/10.1016/0167-9236\(94\)00041-2](http://dx.doi.org/10.1016/0167-9236(94)00041-2)

- MAYER, R. **A gramática da habitação mínima**: análise do projeto arquitetônico da habitação de interesse social em Porto Alegre e Região Metropolitana. Tese (Doutorado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Faculdade de Arquitetura, Programa de Pós-Graduação em Arquitetura, Porto Alegre, BR-RS, 2012. 205.p.
- MCKINNEY, Wes. **Python for Data Analysis**. 2. ed. Sebastopol: O'Reilly Media, 2017. 511 p.
- MEREDITH, M. **From Control to Design**: Parametric/ Algorithmic Architecture. Barcelona, Actar-D, 2008.
- MIAO, Yufan et al. Computational urban design prototyping: Interactive planning synthesis methods – a case study in Cape Town. **International Journal of Architectural Computing**, v. 16, n. 3, p. 212-226, 2018.
- MIRON, L. I. G. **Gerenciamento dos requisitos dos clientes de empreendimentos habitacionais de interesse social**: proposta para o programa integrado entrada da cidade em Porto Alegre/RS. Porto Alegre, 2008. 351 p. Tese (Doutorado em Engenharia) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- MITCHELL, W. **Computer-Aided Architectural Design**. Nova York: Van Nostrand-Reinhold Company, 1997.
- MITCHELL, W. J. **A lógica da Arquitetura**: projeto, computação e cognição. Campinas: Editora da UNICAMP, 2008. 303 p
- MONREAL, Amadeo; JACAS, Joan. Computer Aided Generation of Architectural Typologies. 2004.
- MORAIS, M. **Método para implementação de BIM e custeio-meta em habitação de interesse social**. Campinas: Faculdade de Engenharia Civil – UNICAMP, 2016. 333 p. Tese (Doutorado) – Faculdade de Engenharia Civil, UNICAMP, 2016.
- MORAIS, M.; SANTOS, L. G. M.; PINA, S. A. M. G. A leitura da gramática da forma do conjunto habitacional Campinas F da CDHU em Campinas. **Gestão e Tecnologia de Projetos**, São Paulo, v. 9, n. 2, p. 23-36, jul./dez. 2014. <http://dx.doi.org/10.11606/gtp.v9i1.74345>
- MOREIRA, D. de C. **Os princípios da síntese da forma e a análise de projetos arquitetônicos**. Campinas: Faculdade de Engenharia Civil – UNICAMP, 2007. 375 p. Tese (Doutorado) – Faculdade de Engenharia Civil, UNICAMP, 2007.
- NAJARI, Amirabbas et al. From Altshuller to Alexander: towards a bridge between architects and engineers. **Procedia CIRP**, v. 39, p. 119-124, 2016.
- NAIR, P.; FIELDING, R. **The language of school design**: design patterns or 21st century schools. Minneapolis: Design Share, 2005. 122 p.
- NATIVIDADE, V. G. **Fraturas metodológicas nas arquiteturas digitais**. Dissertação: Mestrado. Universidade de São Paulo. 302 p., 2010.
- NEGENDAHL, K. Building performance simulation in the early design stage: An introduction to integrated dynamic models. **Automation in Construction**, v. 54, p. 39-53, 2015.
- NEVES, I. C. Contribuição de Horst Rittel para a abordagem científica ao projecto no início da era computacional. **PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção**, v. 6, n. 1, p. 39-55, 2015.
- NISZTUK, M.; MYSZKOWSKI, P. B. Hybrid Evolutionary Algorithm applied to Automated Floor Plan Generation. **International Journal of Architectural Computing**, p. 1478077119832982, 2019.

OLIVEIRA E SOUSA, M. N. P.; MOREIRA, D. C. Aplicação da linguagem de padrões à avaliação de projetos de biblioteca pública. **Gestão e Tecnologia de Projetos**, São Paulo, v. 8, n. 2, p. 7-25, jul./dez. 2013. <http://dx.doi.org/10.11606/gtp.v8i2.80946>

OLIVEIRA E SOUSA, M.N.P.; CELANI, M.G.C. Cellular automata: Towards possible applications in urban design education and practice. **Oculum Ensaios**, v.16, n.2, p.395-408, 2019. <http://dx.doi.org/10.24220/2318-0919v16n2a4211>

OSTWALD, M. **Fractal architecture**: knowledge formation within and between architecture and the sciences of complexity. Saarbrücken: VDM Verlag, 2009.

OSTWALD, M. Ethics and the auto-generative design process. **Building research and Information**. 38:4, p.390-400, 2010.

OUNGRINIS, Konstantinos-Alketas; LIAPI, Marianthi. Spatial Elements Imbued with Cognition: A possible step toward the “Architecture Machine”. **International Journal of Architectural Computing**, v. 12, n. 4, p. 419-438, 2014.

OXMAN, R. Theory and design in the first digital age. **Design Studies**, 27(2006):229-265.

OXMAN, Rivka; OXMAN, Robert. New structuralism: design, engineering and architectural technologies. **Architectural Design**, v. 80, n. 4, p. 14-23, 2010.

PATON, B.; DORST, K. Briefing and reframing: A situated practice. **Design Studies**, v. 32, n. 6, p. 573-587, 2011.

PEITGEN, H.; SAUPE, D.; BARNSLEY, M. **The science of fractal images**. New York: Springer, 1988.

PENTTILÄ, H. Describing the changes in architectural information technology to understand design complexity and free-form architectural expression. **Journal of Information Technology in Construction (ITcon)**, v. 11, n. 29, p. 395-408, 2006.

POST, E. Formal reductions of the general combinatorial problem. In: **American Journal of Mathematics**, 65:197-268, 1943.

RADZISZEWSKI, K.; WACZYŃSKA, M. Machine learning algorithm-based tool and digital framework for substituting daylight simulations in early-stage architectural design evaluation. In: **Proceedings of the Symposium on Simulation for Architecture and Urban Design**. Society for Computer Simulation International, 2018. p. 1.

RAHMANI ASL, M. et al. BPOpt: A framework for BIM-based performance optimization. **Energy and Buildings** v.108 p. 401–412, 2015.

RAPPL, K.; MEDRANO, L. S. Modelos de avaliação pré-construção em empreendimentos habitacionais de interesse social: uma revisão sistemática da literatura. **PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção**, Campinas, SP, v. 8, n. 4, p. 286-300, dez. 2017. ISSN 1980-6809. doi: <https://doi.org/10.20396/parc.v8i4.8650238>.

RASCHKA, Sebastian; MIRJALILI, Vahid. **Python machine learning**. Packt Publishing Ltd, 2017.

RITTEL, H. W.; WEBBER, M. M. Dilemmas in a general theory of planning. **Policy Sciences**, v. 4, n. 2, p. 155-169; 1973.

ROSSI, D.; NAGY, Z.; SCHLUETER, A. Adaptive distributed robotics for environmental performance, occupant comfort and architectural expression. **International Journal of Architectural Computing**, v. 10, n. 3, p. 341-359, 2012.

- RUSCHEL, R. C. To BIM or not to BIM? In: III Encontro da Associação Nacional de Pesquisa e Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo. Anais...São Paulo: ENANPARQ, 2014.
- SACKS, R. et al. Automating Design Review with Artificial Intelligence and BIM: State of the Art and Research Framework. In: **Computing in Civil Engineering 2019: Visualization, Information Modeling, and Simulation**. Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 2019. p. 353-360.
- SALDAÑA-MÁRQUEZ, Héctor et al. Sustainable social housing: The comparison of the Mexican funding program for housing solutions and building sustainability rating systems. **Building and Environment**, v. 133, p. 103-122, 2018.
- SALINGAROS, N. Scientific basis for creating architectural forms. **Journal of Architectural and Planning Research**, Chicago, v. 15, n. 4, p.283-294, Winter 2000.
- SALINGAROS, N. **Twelve lectures on architecture: algorithmic sustainable design**. Muchen: Umbau-Verlag, 2010.
- SANTOS R., et al., Bibliometric analysis and review of Building Information Modelling literature published between 2005 and 2015, **Automation in Construction** (2017), <http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2017.03.005>
- SAVOV, Anton; TESSMANN, Oliver; NIELSEN, Stig Anton. Sensitive assembly: gamifying the design and assembly of façade wall prototypes. **International Journal of Architectural Computing**, v. 14, n. 1, p. 30-48, 2016.
- SEGHIER, Taki Eddine et al. Building envelope thermal performance assessment using visual programming and BIM, based on ETVV requirement of Green Mark and GreenRE. **International Journal of Built Environment and Sustainability**, v. 4, n. 3, 2017.
- SEDREZ, Maycon Ricardo. **Arquitetura e complexidade: a geometria fractal como sistema generativo**. 2016. Tese (Doutorado em Arquitetura, Tecnologia e Cidade) – Faculdade de Engenharia, Arquitetura e Urbanismo (FEC), Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2016. Disponível em: <http://repositorio.unicamp.br/handle/REPOSIP/258036>. Acesso em: 16 jun. 2019.
- SIMON, H. **The Sciences of the Artificial**. Cambridge: The MIT Press, 1969.
- SINGH, Manav Mahan; SAWHNEY, Anil; BORRMANN, André. Modular coordination and BIM: development of rule based smart building components. **Procedia Engineering**, v. 123, p. 519-527, 2015.
- SILVA, Erivelton M.; PARAIZO, Rodrigo C. Urban Projects Database Based on Alexander's Pattern Language: The Case of Favela-Bairro. **International Journal of Architectural Computing**, v. 6, n. 3, p. 261-277, 2008.
- SOLIHIN, W., EASTMAN, C. Classification of rules for automated BIM rule checking development. **Automation in construction**, 53, 69-82, 2015.
- SPERLING, David Moreno. Entre conceitos, metáforas e operações: convergências da topologia na arquitetura contemporânea. **Gestão & Tecnologia de Projetos**, v. 3, n. 2, p. 24-55, 2008.
- STEFANI, A. M. de F. **Paradigma ou campo: uma análise da produção acadêmica sobre o processo de projeto**. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) – Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, 2014.282p.
- STINY, G. Two Exercises in Formal Composition. In: **Environment and Planning B**, 3:187-210, 1977.

- SUCCAR, B., 2009. Building information modelling framework: a research and delivery foundation for industry stakeholders. **Automation in Construction** 18 (3), 357-375.
- TAMKE, Martin; NICHOLAS, Paul; ZWIERZYCKI, Mateusz. Machine learning for architectural design: Practices and infrastructure. **International Journal of Architectural Computing**, v. 16, n. 2, p. 123-143, 2018.
- TE BRÖMMELSTROET, M. et al. Towards a pattern language for cycling environments: merging variables and narratives. **Applied Mobilities**, p. 1-19, 2018.
- TREMBLAY, M. C.; HERVNER, A. R.; BERNDT, D. J, Focus Groups for Artifact Refinement and Evaluation in Design Research. **Communications of the Association for Information Systems**, v. 26, n. 27, p. 599-618, 2010.
- TESLA, P.; O'REILLY, U.; KANGAS, M.; KILIAN, A. MoSS – morphogenetic surface structure: a software tool for design exploration. In: **Greenwich Creative Design Symposium**, 2000, Wrocław. **Anais...** Londres: University of Greenwich, 2000. p.1-11.
- TZORTZOPOULOS, Patricia et al. Clients' activities at the design front-end. **Design studies**, v. 27, n. 6, p. 657-683, 2006.
- VAISHNAVI, V.; KUECHLER, W. **Design Research in Information Systems**. 2005. Disponível em: <[http:// desrist.org/design-research-in-information-systems](http://desrist.org/design-research-in-information-systems)>. Acesso em: 14 fev. 2017.
- VAN AKEN, J. E. Management Research Based on the Paradigm of the Design Sciences: The Quest for Field- Tested and Grounded Technological Rules. **Journal of Management Studies**, v. 41, n. 2, p. 219-246, 2004. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1467-6486.2004.00430.x>
- VOORDT, T. J. M. V. D.; WEGEN, H. B. R. V. **Architecture in use: an introduction to the programming, design and evaluation of buildings**. Routledge, 2005.
- VOORDT, T. J. M. V. D.; WEGEN, H. B. R. V. **Arquitetura sob o olhar do usuário: programa de necessidades, projeto e avaliação de edificações**. São Paulo: Oficina de Textos, 2013.
- VAZ, C. E. V. **As linguagens compositivas de Roberto Burle Marx: aplicação e caracterização pela gramática da forma**. 2009. 166 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)-Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2009.
- VAZ, C. E. V. **Um método de ensino de projeto baseado em precedentes- sistemas generativos e ontologias aplicados no ensino de arquitetura paisagística**. Campinas: Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo - UNICAMP, 2011. 238p. Tese (Doutorado) - Faculdade de Engenharia Civil, arquitetura e Urbanismo, UNICAMP, 2011.
- VELOSO, P. Cybernetic diagrams: design strategies for an open game. **International Journal of Architectural Computing**, v. 12, n. 4, p. 379-397, 2014.
- 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**, v. 96, p. 224-235, 2018.
- WANG, Yixiao et al. Designing Intelligent Spaces as if They Were Human: A “Space Agent” Framework. In: **2018 4th International Conference on Universal Village (UV)**. IEEE, 2018. p. 1-6.
- WATT, Jeremy; BORHANI, Reza; KATSAGGELOS, Aggelos K. **Machine learning refined: foundations, algorithms, and applications**. Cambridge University Press, 2016.
- WIERZBICKI, M.; DE SILVA, C. W.; K., Don H. BIM-HISTORY and TRENDS. **CONVR2011**, International Conference on Construction Applications of Virtual Reality, 2011.

10. APÊNDICE A

Proposta de algoritmização dos parâmetros de projeto para o enriquecimento semântico projetual

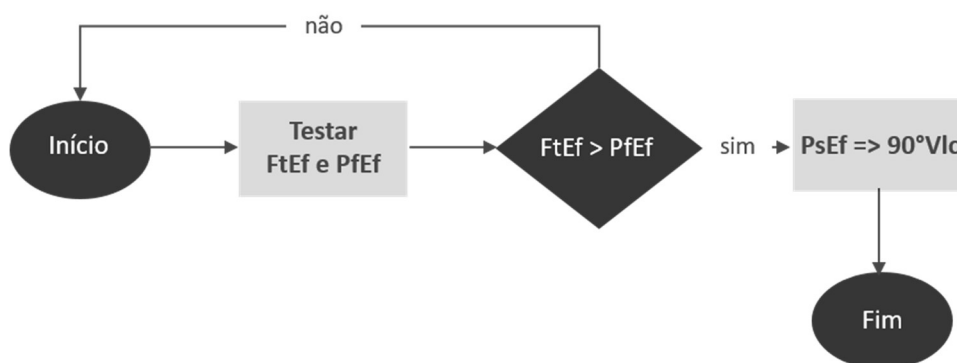
Unidades em fita (38-row houses)

O parâmetro de projeto Unidades em fita de senso de urbanidade prevê “**Posicionar casas** ao longo de caminhos para pedestres que formam **90 graus com vias locais** e estacionamentos, e dar a cada casa **frente longa e profundidade rasa**, como por exemplo: lote (9 x 13m), caminho (9 x 2,5m), casa (9 x 6m), e quintal semi-público (9 x 4,5m).” (grifo nosso). A expressão matemática equivalente é a Equação 1 representada no fluxograma da Figura .

$$PsEf \Rightarrow 90^\circ Vlc; FtEf > PfEf \quad (1)$$

Onde: PsEf=Posição da edificação; FtEf=Frente da edificação; PrEf=Profundidade da edificação; Vlc=Via local.

Figura I – Fluxograma (unidade em fita)



Fonte: Autoria Própria.

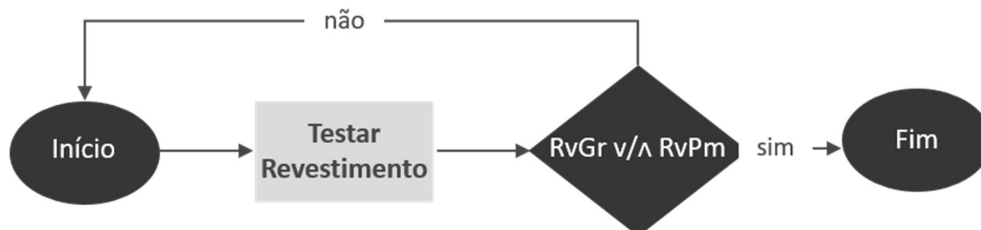
Ruas permeáveis (51-green streets)

O parâmetro de projeto Ruas Permeáveis de senso de urbanidade prevê que “**Ruas locais** podem ser **gramadas e/ ou revestidas com elementos que não impermeabilizem** totalmente o solo.” (grifo nosso). A expressão matemática equivalente é a Equação (2) representada no fluxograma da Figura 27.

$$Vcl \Rightarrow RvGr \vee / \wedge RvPm \quad (2)$$

Onde: Vlc= Vias locais; RvGr = Revestimento em grama; RvPm = Revestimento permeável.

Figura II – Fluxograma (ruas permeáveis)



Fonte: Autoria Própria.

Em alguns casos identificou-se a possibilidade de agrupamento dos *patterns* na formulação do fluxograma, como por exemplo, os *patterns*: Estacionamento camuflado (97-*shielded parking*) e Estacionamento pequeno (103-*small parking lots*).

Estacionamento camuflado (97-*shielded parking*)

O parâmetro de projeto Estacionamento camuflado de senso de urbanidade prevê que “Quando necessário criar **grande estacionamento, posicione-o atrás de algo que possa camuflá-lo**: UHs conectadas, terraços escalonados, lojas, taludes gramados. Crie entrada naturalmente demarcada para o edifício servido e facilmente visível a partir da entrada do estacionamento.” (grifo nosso).

Estacionamento pequeno (103-*small parking lots*)

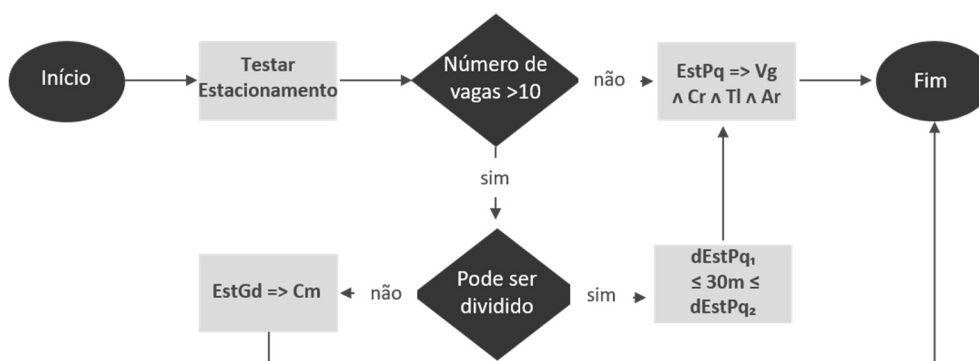
O parâmetro de projeto Estacionamento pequeno de senso de urbanidade prevê que “Crie vários estacionamentos pequenos, cada um envolto por paredes de vegetação, cercas, taludes ou árvores. Espalhe-os aproximadamente a 30m de distância.” (grifo nosso). A expressão matemática equivalente aos dois *patterns* é a Equação (3) representada no fluxograma da Figura III.

$$EstGd \Rightarrow Cm ; EstPq \Rightarrow Vg \wedge Cr \wedge Tl \wedge Ar ; \quad (3)$$

$$dEstPq_1 \leq 30m \leq dEstPq_2$$

Onde: EstGd = Estacionamento grande; Cm = Camuflado; EstPq = Estacionamento pequeno; Vg= Vegetação; Cr = Cerca; Tl = Talude; Ar = Árvore; d = Distância.

Figura III - Fluxograma (estacionamento camuflado e estacionamento pequeno)



Fonte: Autoria Própria.

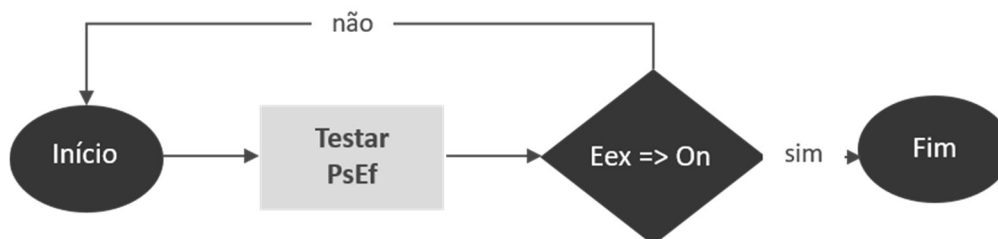
Orientação solar para espaço externo (105-south facing outdoors)

O parâmetro de projeto Orientação solar para espaço externo de senso de urbanidade prevê “**Posicionar edificações ao Sul dos espaços externos**, mantendo estes ao Norte (seno hemisfério Sul).” (grifo nosso). A expressão matemática equivalente é a Equação (4) representada no fluxograma da Figura IV.

$$PsEf \Rightarrow Os(Eex); Eex \Rightarrow On \quad (4)$$

Onde: PsEf = Posição da edificação; Os = Orientação sul; Eex = Espaço externo; On = Orientação norte.

Figura IV - Fluxograma (orientação solar para espaço externo)



Fonte: Autoria Própria.

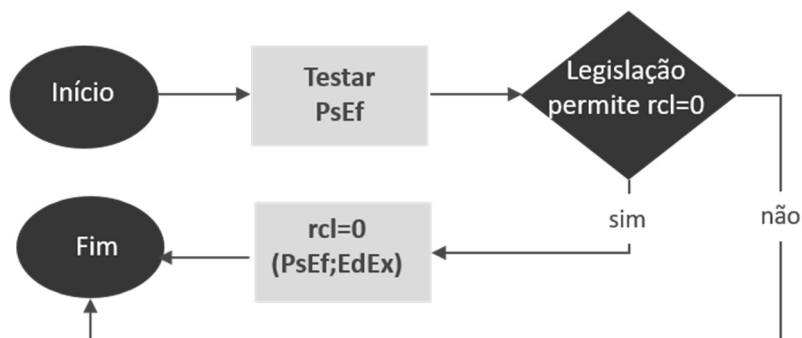
Edifícios conectados (108-connected buildings)

O parâmetro de projeto Edifícios conectados de senso de urbanidade prevê que “Onde possível, **conectar edifícios novos aos existentes**. Não manter recuos entre eles, mas formá-los como continuações.” (grifo nosso). A expressão matemática equivalente é a Equação (5) representada no fluxograma da Figura V.

$$EdEx \Rightarrow rcl = 0(PsEf; EdEx) \quad (5)$$

Onde: EdEx = Edificação Existente; rcl = recuo lateral; PsEdf = Posição da Edificação.

Figura V58 - Fluxograma (edifícios conectados)



Fonte: Autoria Própria.

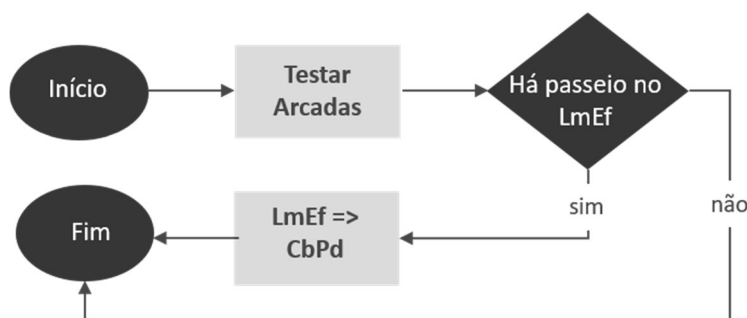
Arcadas (119-arcades)

O *pattern* Arcadas de urbanidade prevê que “**Crie arcada sobre passeio ao longo dos limites de edificações para conectá-las**, proporcionando proteção para os pedestres.” (grifo nosso). A expressão matemática equivalente é a Equação (6) representada no fluxograma da Figura VI.

$$LmEf \Rightarrow CbPd \quad (6)$$

Onde: LmEf = Limite da Edificação; CbPd = Cobertura para pedestre.

Figura VI- Fluxograma (arcadas)



Fonte: Autoria Própria.

Caminhos e lugares (120-paths & goals)

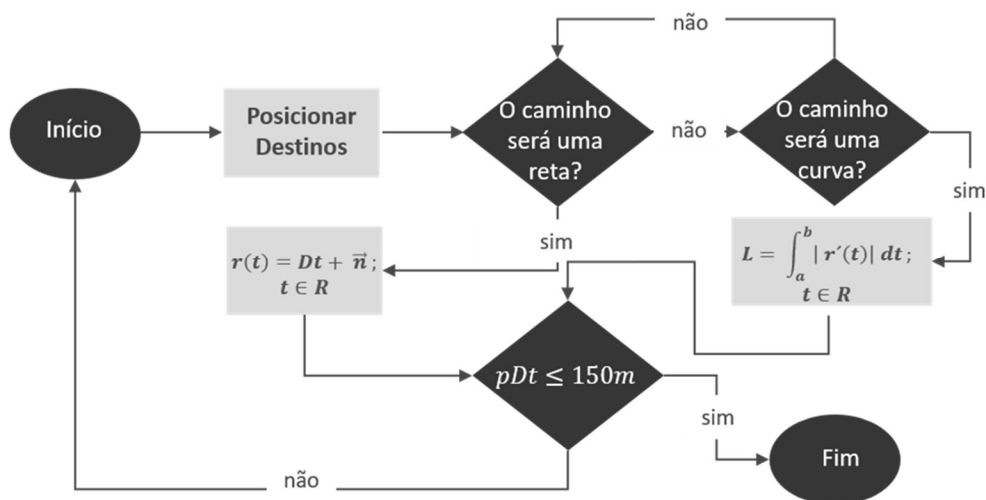
O parâmetro de projeto Caminhos e lugares de senso de urbanidade, prevê que “Para o arranjo de caminhos primeiramente **posicione destinos em locais de interesse natural** para, em seguida, **conectá-los formando caminhos**. Sua **forma pode ser reta ou levemente curvada**, e diferenciada ao redor dos destinos. A **distância** entre

destinos deve preferencialmente **não ultrapassar** cerca de **150m.**” (grifo nosso). A expressão matemática equivalente é a Equação (7) representada no fluxograma da Figura VII.

Equação paramétrica da reta: $r(t) = Dt + \vec{n}; t \in R$
 Equação paramétrica da curva: $L = \int_a^b |r'(t)| dt; t \in R$
 $pDt \leq 150m$ (7)

Onde: Dt= Destino; pDt= Percurso entre dois destinos.

Figura VII - Fluxograma (caminhos e lugares)



Fonte: Autoria Própria.

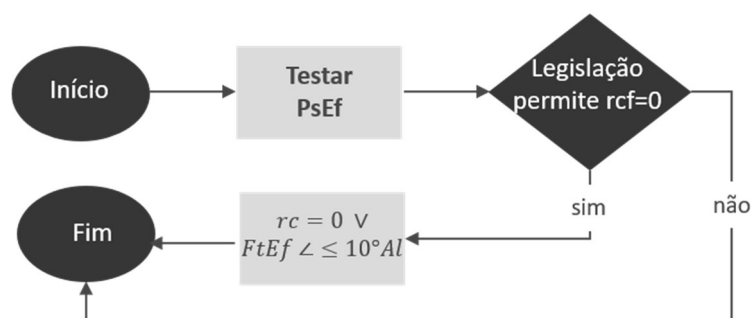
Recuo frontal nulo (122-building fronts)

O parâmetro de projeto Recuo frontal nulo de senso de urbanidade prevê que “Posicione **parte frontal da edificação sem recuo** ao longo de caminhos e ruas. Quando cabível **permita ângulos levemente diferenciados ao alinhamento** para que se acomode ao formato do caminho ou rua.” (grifo nosso). A expressão matemática equivalente é a Equação (8) representada no fluxograma da Figura VIII.

$$PsEf \Rightarrow rcf = 0 \vee FtEf \angle \leq 10^\circ Al \quad (8)$$

Onde: PsEdf = Posição da Edificação; rcf = recuo frontal; Al = Alinhamento.

Figura VIII- Fluxograma (recuo frontal nulo)



Fonte: Autoria Própria.

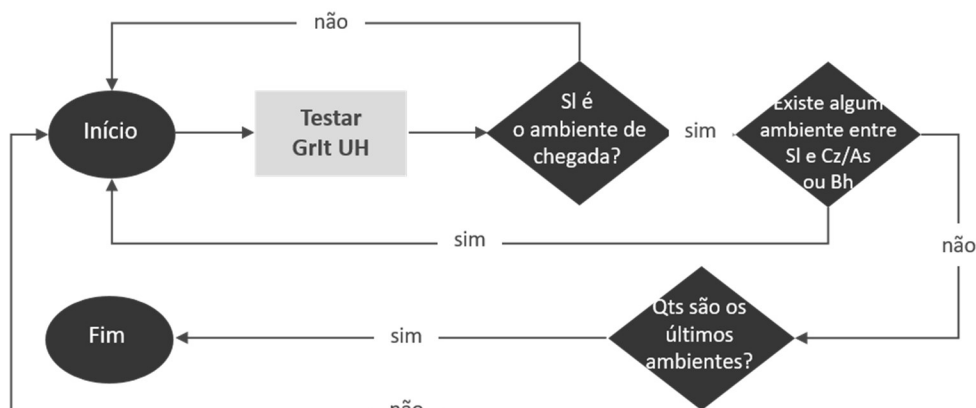
Gradiente de intimidade (127-*intimacy gradient*)

O parâmetro de projeto Gradiente de intimidade de senso de habitabilidade prevê que “Arranje os **ambientes da UH** de modo a criar **sequência** que **comece pelas partes mais públicas** e se **encaminhe para áreas um pouco mais privadas**, finalizando com os domínios mais íntimos.” (grifo nosso). A expressão matemática equivalente é a Equação (9) representada no fluxograma da Figura IX.

$$GrIt(UH) \Rightarrow Sl \rightarrow (Cz \wedge As) \vee Bh \rightarrow Qt \quad (9)$$

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

Figura IX - Fluxograma (gradiente de intimidade)



Fonte: Autoria Própria.

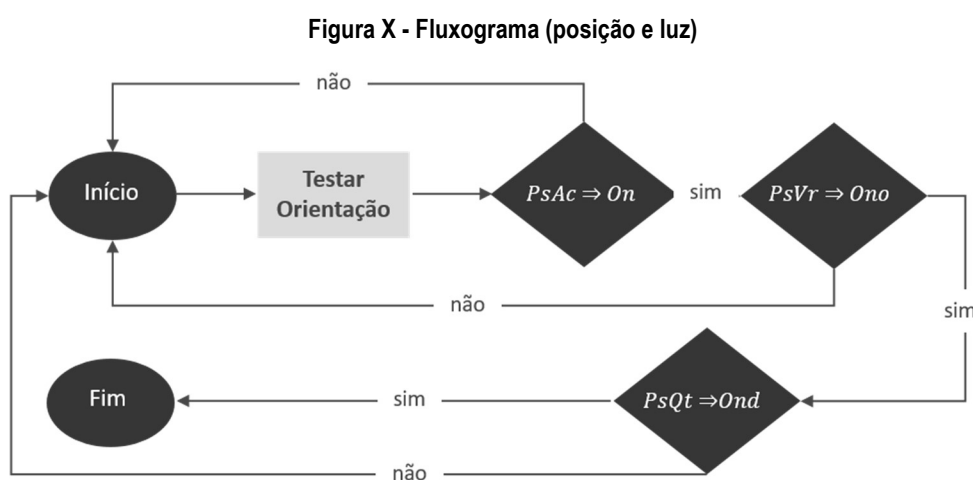
Posição e Luz (128-*indoorsunlight*)

O parâmetro de projeto Posição e luz de senso de habitabilidade prevê que “Posicione os ambientes mais importante são longo da face Norte, e **espalhe a UH no eixo Leste-**

Oeste: exposição Norte para áreas comuns; Nordeste para quartos; Noroeste para varanda.” (grifo nosso). A expressão matemática equivalente é a Equação (10) representada no fluxograma da Figura X.

$$PsAc \Rightarrow On ; PsQt \Rightarrow Ond ; PsVr \Rightarrow Ono \quad (10)$$

Onde: PsAc = Posição da área comum; PsQt = Posição do quarto; PsVr = Posição da varanda; On = Orientação norte; Ond = Orientação nordeste; Ono = Orientação noroeste.



Fonte: Autoria Própria.

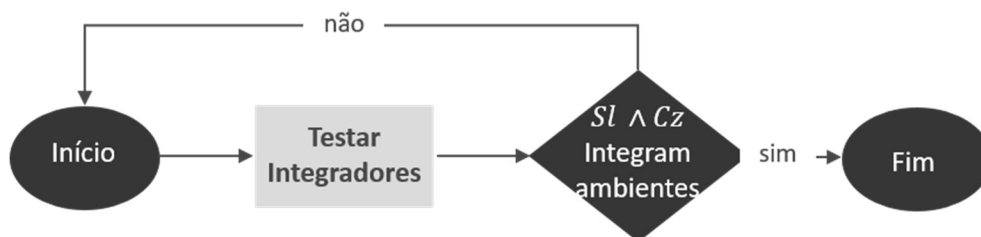
Circulação com interação (131-flow through rooms)

O parâmetro de projeto Circulação com interação de senso de habitabilidade prevê que “Evite corredores: use ambientes mais públicos como ambientes para movimento, posicionando-os de modo a formarem uma corrente ou laço. Crie sentimento de generosidade, com variedade de vistas internas e externas.” (grifo nosso). A expressão matemática equivalente é a Equação (11) representada no fluxograma da Figura XI.

$$As \wedge Bh \wedge Qt < AmPb < Sl \wedge Cz \quad (11)$$

Onde: Sl = Sala; Cz = Cozinha; As = Área de Serviço; Bh = Banheiro; Qt = Quarto; AmPb = Ambientes Públicos.

Figura XI- Fluxograma (circulação com interação)



Fonte: Autoria Própria.

Outro caso identificado com a possibilidade de agrupamento dos *patterns* na formulação do fluxograma, foram os *patterns*: Escada com passagem visível (133-*staircase as a stage*) e Escadas abertas (158-*open stairs*).

Escada com passagem visível (133-*staircase as a stage*)

O parâmetro de projeto Escada com passagem visível de senso de habitabilidade prevê que “**Posicione a escada** em local chave, **central e visível**, tratando-a como parte do ambiente em que se situa. Proporcionar alargamento para se sentar.” (grifo nosso).

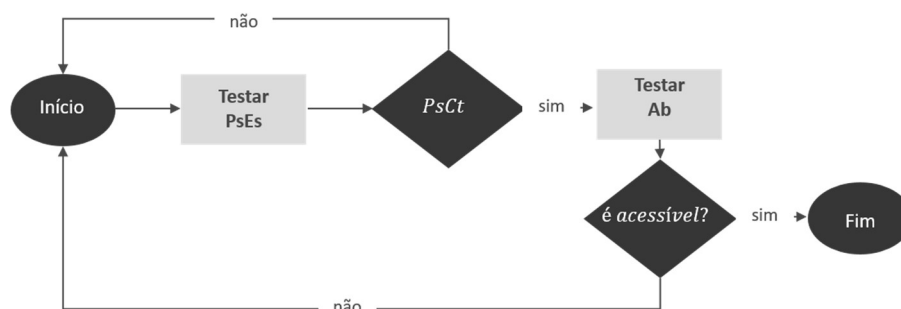
Escadas abertas (158-*open stairs*)

O parâmetro de projeto Escadas abertas de senso de habitabilidade prevê que “Conecte moradores individuais de pavimentos superiores diretamente ao térreo criando **escadas abertas** de fácil acesso pela rua ou caminho.” (grifo nosso). A expressão matemática equivalente aos dois *patterns* é a Equação (XII) representada no fluxograma da Figura 42.

$$Es \Rightarrow PsCt ; Es \Rightarrow Ab \quad (12)$$

Onde: Es = Escada; PsCt = Posição central; Ab = Abertas.

Figura XII - Fluxograma (escada com passagem visível e escadas abertas)



Fonte: Autoria Própria.

Abaixo apresentam-se os *patterns*: Circulação com contraste (135-*tapestry of light and dark*), Ambiente junto à janela (180-*window place*), Aberturas Naturais (221-*natural doors and windows*), Vistas (192-*windows overlooking life*), Janelas salientes para a rua (164-*street windows*) e Estratégias para privacidade (N3) como uma possibilidade de agrupamento na formulação do fluxograma:

Circulação com contraste (135-*tapestry of light and dark*)

O parâmetro de projeto Circulação com contraste de senso de habitabilidade prevê que **“Crie alternadamente áreas mais iluminadas e mais escuras ao longo da UH, de modo a orientar o movimento: pessoas caminham naturalmente em direção à luz.”** (grifo nosso).

Ambiente junto à janela (180-*window place*)

O parâmetro de projeto Ambiente junto à janela de senso de habitabilidade prevê **“Crie ambientes junto a janelas** em locais usados durante o dia.” (grifo nosso)

Aberturas Naturais (221-*natural doors and windows*)

O parâmetro de projeto Aberturas Naturais de senso de habitabilidade prevê **“Dimensione as esquadrias de acordo com o ambiente.** Para a sensação de segurança, as aberturas devem diminuir de dimensão e também ter peitoris mais altos nos pisos superiores.” (grifo nosso)

Vistas (192-*windows over looking life*)

O parâmetro de projeto Vistas de senso de habitabilidade prevê **“Em cada ambiente, distribua janelas** de modo que sua área total esteja conforme ao indicado para sua região, posicionando-as para **obtenção das melhores vistas possíveis:** atividade da rua, tranquilidade do jardim, algo diferente da cena interior.” (grifo nosso)

Janelas salientes para a rua (164-*street windows*)

O parâmetro de projeto Janelas salientes para a rua de senso de habitabilidade prevê que **“Em ruas movimentadas, posicione janelas** salientes com assento ou em

passagem **olhando sobre a rua**. Se no térreo, mantenha-as elevadas o suficiente para garantir a privacidade.” (grifo nosso)

Estratégias para privacidade (N3)

O parâmetro de projeto Estratégias para privacidade de senso de habitabilidade prevê que “Estratégias variadas podem contribuir conjuntamente para a privacidade (especialmente visual) entre UHs: **observar distância entre UHs confrontantes**; criar mini-pátios reservados para parte das aberturas; usar clarabóias, janelas altas, vidro corrugado ou translúcido, elementos opacos posicionados em ângulo em relação à abertura, elementos vazados (cobogós), vegetação, desnível de piso entre passeio e a UH.” (grifo nosso)

As expressões matemáticas equivalentes aos *patterns* são as Equações (13, 14, 15 e 16) representada no fluxograma da Figura XIII.

$$Jn \Rightarrow dUh \geq 5m; se dUh < 5m \Rightarrow Clb \vee Jn \Rightarrow Pt \geq 1,8m \vee Vdc \vee Vtl \quad (13)$$

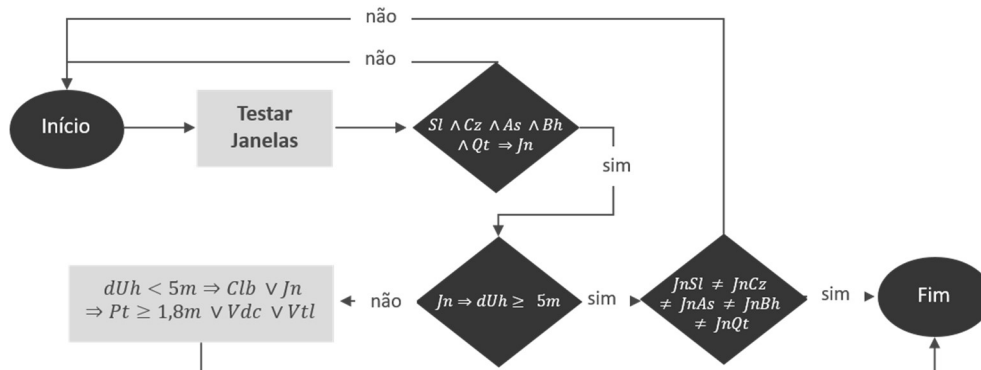
$$Sl \wedge Cz \wedge As \wedge Bh \wedge Qt \Rightarrow Jn \quad (14)$$

$$Jn = L \times C \times Pt; Crr \Rightarrow \emptyset Jn \quad (15)$$

$$JnSl \neq JnCz \neq JnAs \neq JnBh \neq JnQt \quad (16)$$

Onde: L = Largura; C = Comprimento; Pt = Peitoril; Jn = Janela; Sl = Sala; Cz = Cozinha; As = Área de Serviço; Bh = Banheiro; Qt = Quarto; Crr = corredor; dUh=distância entre unidades habitacionais; Clb=Clarabóia; Vdc=Vidro corrugado; Vtl=Vidro translúcido.

Figura XIII - Fluxograma (circulação com contraste; ambiente junto à janela, aberturas naturais e vistas)



Fonte: Autoria Própria.

Outro agrupamento possível foi realizado com os *patterns* Ambientes semiabertos ao longo dos limites (166-gallery surround) e Varanda utilizável (167-six-foot balcony).

Ambientes semiabertos ao longo dos limites (166-gallery surround)

O parâmetro de projeto Ambientes semiabertos ao longo dos limites de senso de habitabilidade prevê que “Sempre que possível e **em todos os pavimentos projete varandas**, sacadas, galerias, nichos, lugares para sentar, pergolados, etc. nos limites da edificação, especialmente onde se abrem para espaços públicos e ruas, e conecte os com portas ao exterior.” (grifo nosso)

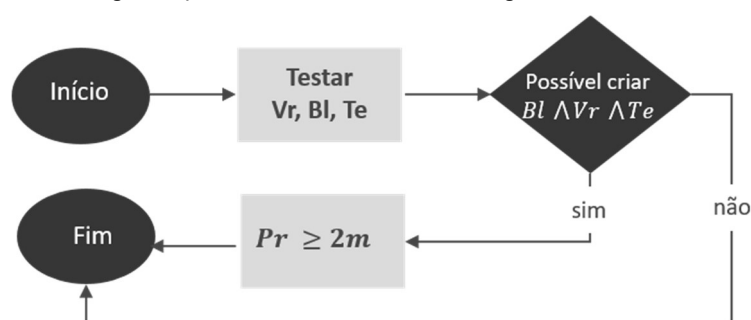
Varanda utilizável (167-six-foot balcony)

O parâmetro de projeto Varanda utilizável de senso de habitabilidade prevê “Dimensioná-los (**balcões, varandas e terraços**) com **pelo menos cerca de 2m de profundidade**.” (grifo nosso) A expressão matemática equivalente aos *patterns* é a Equação (17) representada no fluxograma da Figura XIV.

$$Edf \Rightarrow Vr;Bl \wedge Vr \wedge Te \Rightarrow Pr \geq 2m \quad (17)$$

Onde: Edf = Edificação; Vr = Varandas; Bl = Balcões; Te = Terraços; Pr = Profundidade.

Figura XIV – Fluxograma (ambientes semiabertos ao longo dos limites e varanda utilizável)



Fonte: Autoria Própria.

Entrelaçamento edificação e lugar (168-connection to the earth)

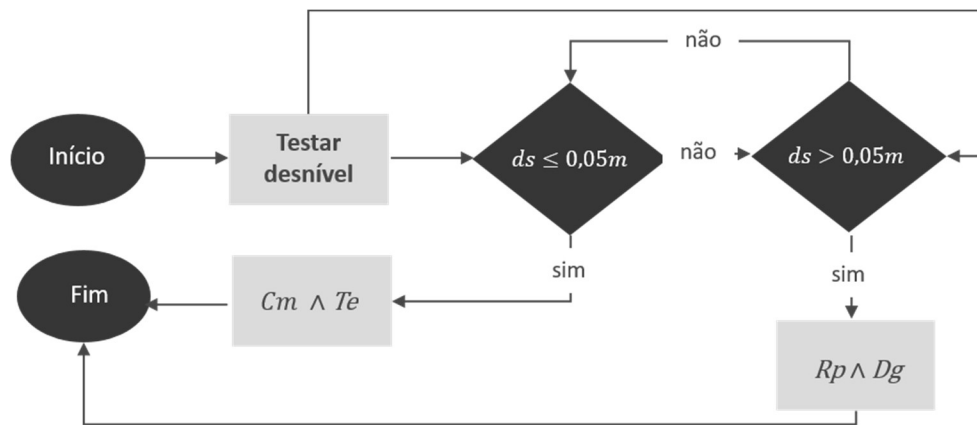
O parâmetro de projeto Entrelaçamento edificação e lugar de senso de urbanidade prevê que “Conecte a edificação ao solo através de uma série de **caminhos, terraços, degraus e rampas ao longo de seus limites**. Posicione-os de modo a tornar os limites

ambíguos, tornando impossível determinar exatamente onde a edificação começa.” (grifo nosso) A expressão matemática equivalente ao *pattern* é a Equação (18) representada no fluxograma da Figura XV.

$$Cm \wedge Te \Rightarrow ds \leq 0,05m; Rp \wedge Dg \Rightarrow ds > 0,05m \quad (18)$$

Onde: Cm = Caminhos; Te = Terraços; Rp = Rampas; Dg = Degraus.

Figura XV – Fluxograma (entrelaçamento edificação e lugar)



Fonte: Autoria Própria.

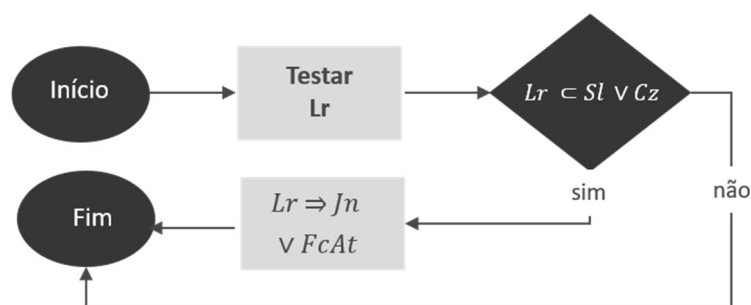
Lareira (181-the fire)

O parâmetro de projeto Lareira de senso de habitabilidade prevê que “**Crie lareira em espaço de convívio** (sala, cozinha, etc.). **Crie uma janela ou outro foco de atenção próximo** à lareira para sustentar o ambiente quando o fogo não estiver aceso.” (grifo nosso) A expressão matemática equivalente ao *pattern* é a Equação (19) representada no fluxograma da Figura XVI.

$$Lr \subset Sl \vee Cz; Lr \Rightarrow Jn \vee FcAt \quad (19)$$

Onde: Lr = Lareira; Sl = Sala; Cz = Cozinha; Jn = Janela; FcAt = Foco de atenção

Figura XVI – Fluxograma (lareira)



Fonte: Autoria Própria.

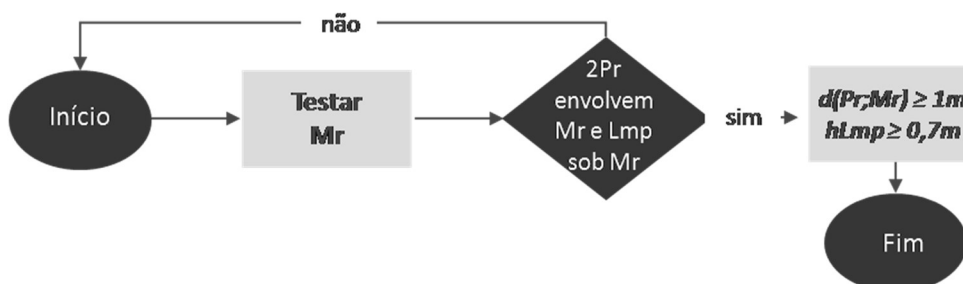
Ambiência para refeições (182-eating atmosphere)

O parâmetro de projeto Ambiência para refeições de senso de habitabilidade prevê que “Reserve **ambiente espaçoso para mesa de refeições sob iluminação pontual**, preferencialmente envolto a paredes ou zonas mais escuras.” (grifo nosso) A expressão matemática equivalente ao *pattern* é a Equação (20) representada no fluxograma da Figura XVII.

$$Mr \Rightarrow 2Pr \wedge Lmp; d(Pr_1; Mr) \geq 1,0m; hLmp \geq 0,70m \quad (20)$$

Onde: Mr = Mesa de refeição; Pr = parede; d = distância; Lmp = Iluminação pontual; h=Altura

Figura XVII – Fluxograma (ambiência para refeições)



Fonte: Autoria Própria.

A seguir, são apresentados os *patterns*: Variação de pé-direito (190-ceiling height variety) e Nichos infantis (203-child caves), também como agrupamento:

Variação de pé-direito (190-ceiling height variety)

O parâmetro de projeto Variação de pé-direito de senso de habitabilidade prevê “Variar o pé-direito especialmente entre cômodos que se comunicam, fazendo perceber a intimidade relativa dos diferentes ambientes. **Pé-direito alto para**

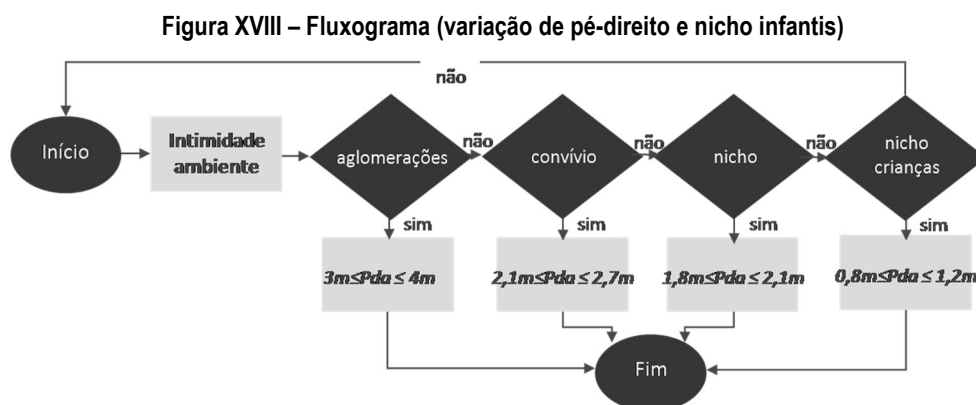
aglomerações (3 a 4m), médio para convívio de menos pessoas (2,1 a 2,7m) e nichos para 1 a 2 pessoas (1,8 a 2,1m)." (grifo nosso)

Nichos infantis (203-child caves)

O parâmetro de projeto Nichos infantis de senso de habitabilidade prevê "Projetar pequenos **nichos** em áreas onde **crianças** possam brincar. Aproveite locais subutilizados como de baixo de escadas, sob balcões de cozinhas, etc. Faça o teto baixo, de **0,8 a 1,2m**, e a entrada pequena." (grifo nosso) A expressão matemática equivalente aos *patterns* é a Equação (21) representada no fluxograma da Figura XVIII.

$$3m \leq Pda \leq 4m \text{ e } 2,1m \leq Pdm \leq 2,7m; 1,8m \leq Pdn \leq 2,1; 0,8m \leq Pdnc \leq 1,2 \quad (21)$$

Onde: Pda = Pé-direito alto; Pdm = Pé-direito médio; Pdn= Pé-direito nicho; Pdnc=Pé-direito nicho de criança



Fonte: Autoria Própria.

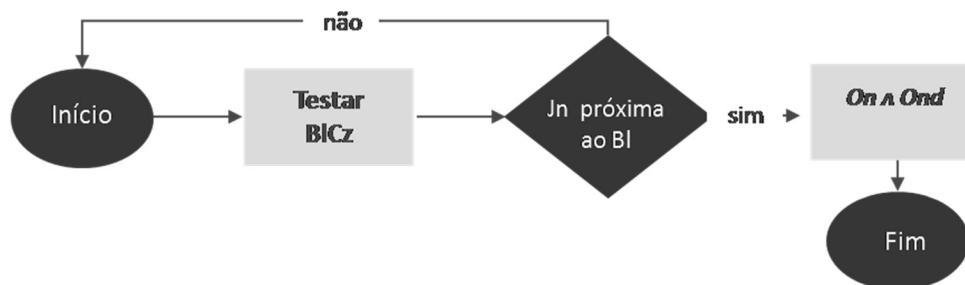
Balcão iluminado (199-sunny counter)

O parâmetro de projeto Balcão iluminado de senso de habitabilidade prevê "Posicione a maior parte do **balcão (cozinha)** para o **Norte e Nordeste** (hemisfério Sul), com grandes **janelas** à sua volta" (grifo nosso) A expressão matemática equivalente ao *pattern* é a Equação (22) representada no fluxograma da Figura XIX.

$$BLCz \Rightarrow Jn \wedge On \wedge Ond \quad (22)$$

Onde: BLCz = Balcão de cozinha; Jn = Janela; On=Orientação norte; Ond=Orientação nordeste.

Figura XIX – Fluxograma (balcão iluminado)



Fonte: Autoria Própria.

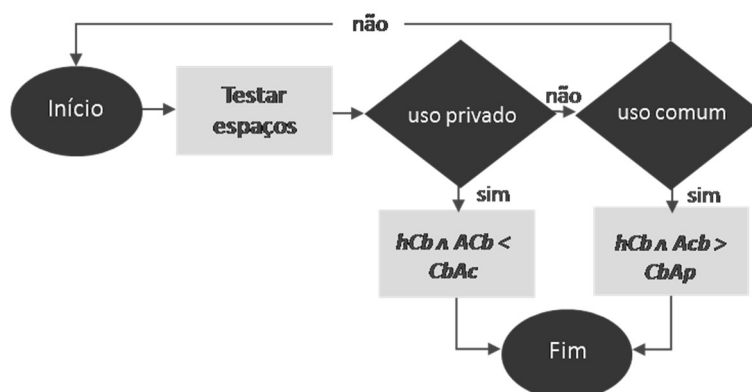
Layout da cobertura (209-roof layout)

O parâmetro de projeto Layout da cobertura de senso de habitabilidade prevê “Arranje a **cobertura** de modo que cada porção corresponda a uma entidade social no complexo do edifício: posicione as **maiores (e mais altas) sobre os espaços de convívio** mais importantes, e as **menores a partir das maiores**, como meias-águas sobre varandas e nichos.” (grifo nosso) A expressão matemática equivalente ao *pattern* é a Equação (23) representada no fluxograma da Figura XX.

$$CbAp < hCb \wedge ACb \text{ se } CbAc > hCb \wedge ACb \quad (23)$$

Onde: Ap=Áreas privadas, Cb=cobertura, Ac=Áreas Comuns; A=área.

Figura XX– Fluxograma (layout da cobertura)



Fonte: Autoria Própria.

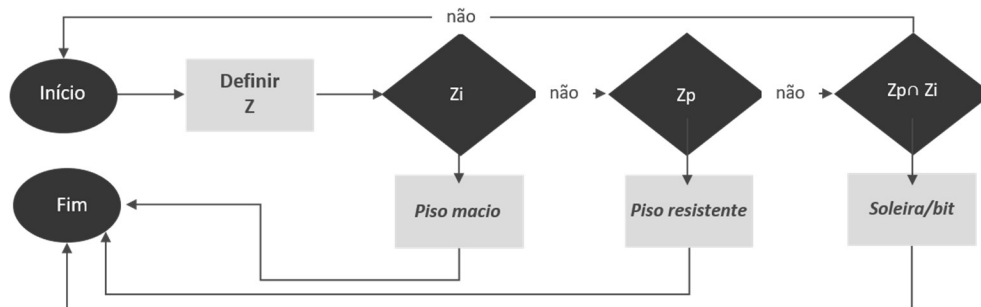
Zonas de pisos (233-floor surface)

O parâmetro de projeto Zonas de pisos de senso de habitabilidade prevê “Crie **zonas pública e íntima**, correspondendo respectivamente a **materiais resistentes e macios**. **Marque** claramente a **transição** entre elas.” (grifo nosso) A expressão matemática equivalente ao *pattern* é a Equação (24) representada no fluxograma da Figura XXI.

$$\frac{Z_p}{Z_i} = As + Am; Z_p As \cap Z_p Am = sl \quad (24)$$

Onde: Z_p =Zona pública; Z_i =Zona íntima; As =Área seca; Am =Área molhada; sl =soleira.

Figura XXI – Fluxograma (zona de piso)



Fonte: Autoria Própria.

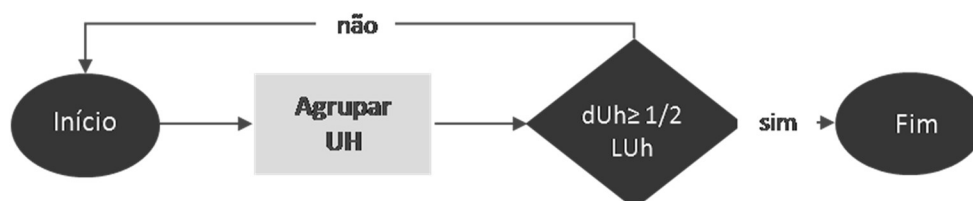
Unidades ao redor de pátio (N1)

O parâmetro de projeto Unidades ao redor do pátio de senso de habitabilidade prevê “Formar **grupos de UHs ao redor de pátios e caminhos comuns** sem, contudo, interromper acessibilidade, para que qualquer um que ande entre elas não se sinta um invasor.” (grifo nosso) A expressão matemática equivalente ao *pattern* é a Equação (52) representada no fluxograma da Figura XXII.

$$dUh \geq \frac{1}{2}LUh \quad (25)$$

Onde: dUh =Distância entre UHs; LUh =Largura da UH.

Figura XXII59 – Fluxograma (unidades ao redor do pátio)



Fonte: Autoria Própria.

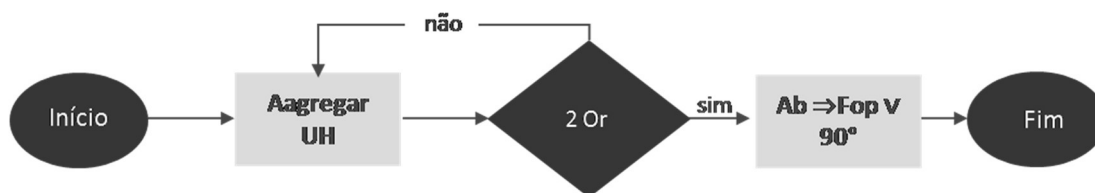
Mais de uma orientação para unidades agregadas (N2)

O parâmetro de projeto Mais de uma orientação para unidades agregadas de senso de habitabilidade prevê “**Agregar UHs de modo a garantir mais de uma orientação para cada uma**, em harmonia com opções de circulação coletiva horizontal e vertical e com estratégias para garantia da privacidade. **As aberturas podem acontecer em faces opostas ou a 90 graus**, e os ambientes internos podem ter barreiras do tipo muretas ou paredes com aberturas.” (grifo nosso) A expressão matemática equivalente ao *pattern* é a Equação (26) representada no fluxograma da Figura XXIII.

$$Uh_1 + Uh_2 + Uh_n \Rightarrow 2Or ; Ab \Rightarrow Fop \vee 90^\circ \quad (26)$$

Onde: Uh=Unidade habitacional; Or=Orientação; Ab=Aberturas; Fop=Face oposta.

Figura XXIII– Fluxograma (mais de uma orientação para unidades agregadas)



Fonte: Autoria Própria.

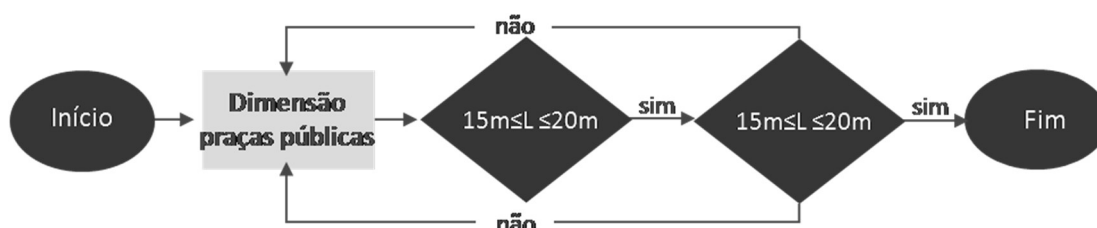
Praças pequenas (61-small public squares)

O parâmetro de projeto Praças pequenas de senso de urbanidade prevê “Conformar **praças públicas** de modo que sua **largura fique entre 15 a 20m**. O **comprimento** pode certamente ser **maior**.” (grifo nosso) A expressão matemática equivalente ao *pattern* é a Equação (27) representada no fluxograma da Figura XXIV.

$$PçPb \Rightarrow 15m \leq L \leq 20m \wedge C \geq 20m \quad (27)$$

Onde: PçPb=Praça pública; L=Largura; C=Comprimento.

Figura XXIV – Fluxograma (praças pequenas)



Fonte: Autoria Própria.

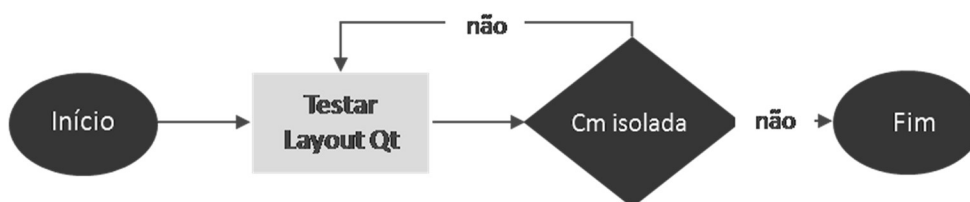
Nicho para dormir (188-bed alcove)

O parâmetro de projeto Nicho para dormir de senso de habitabilidade prevê “**Não coloque camas isoladas em cômodos vazios**: crie nichos para dormir em ambientes com outras funções além de dormir, de modo a tornar a cama um domínio privativo (e não o ambiente).” (grifo nosso) A expressão matemática equivalente ao *pattern* é a Equação (28) representada no fluxograma da Figura XXV.

$$Qt \Rightarrow Cm + Arm + Bc \quad (28)$$

Onde: Qt=Quarto; Cm=Cama; Arm=Armário; Bc=Bancada.

Figura XXV – Fluxograma (nichos para dormir)



Fonte: Autoria Própria.

Parede semiaberta (193-half-open wall)

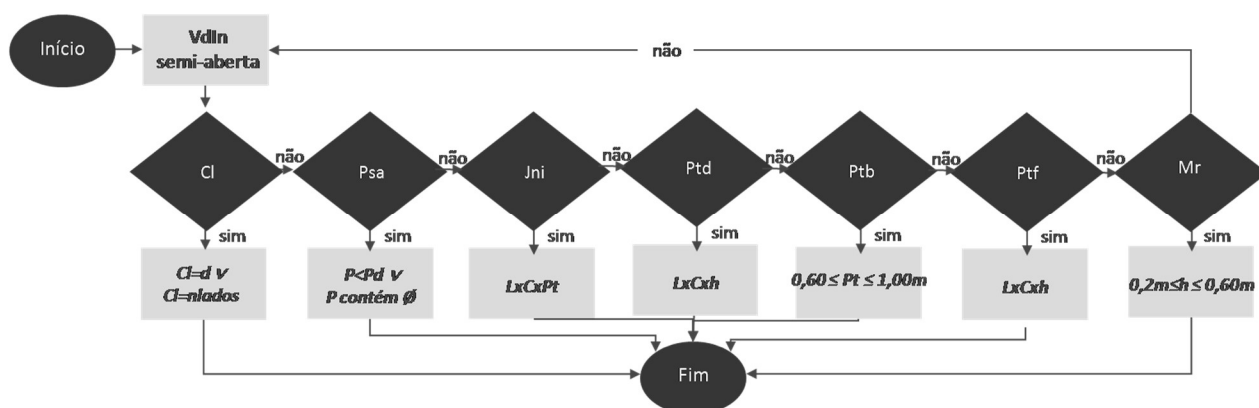
O parâmetro de projeto Parede semiaberta de senso de habitabilidade prevê “Evite extremos: use combinações de colunas, paredes semiabertas, janelas internas, portas deslizantes, peitoril baixo, portas francesas e muretas.” (grifo nosso) A expressão matemática equivalente ao *pattern* é a Equação (29) representada no fluxograma da Figura XXVI.

$$VdIn \Rightarrow Cl \wedge Psa \wedge Jni \wedge Ptd \wedge Ptb \wedge Ptf \wedge Mr \quad (29)$$

$$Cl = d \vee Cl = nlados; Psa = P < Pd \vee P \text{ contém } \emptyset; Jni = L \times C \times Pt; Ptd = L \times C \times h; Ptb = 0,60 \leq Pt \leq 1,00m; Ptf = L \times C \times h; Mr = 0,20 \leq h \leq 0,60m$$

Onde: VdIn = Vedação Interna; Cl = Colunas; Psa = Paredes semiabertas; Jni = Janela interna; Ptd = Portas deslizantes; Ptb = Peitoril baixo; Ptf = Portas francesas; Mr = Muretas; d = diâmetro; nlados = número de lados; L = Largura; C = Comprimento; Pt = Peitoril; h = Altura.

Figura XXVI – Fluxograma (parede semiaberta)



Fonte: Autoria Própria.