

Universidade Federal de Juiz de Fora
Faculdade de Engenharia
Programa de Pós-graduação em Ambiente Construído

Leonardo Sanches

**PARAMETRIZAÇÃO E SISTEMAS GENERATIVOS COMO APOIO À TOMADA
DE DECISÕES EM PROJETOS DE ARQUITETURA APLICADOS À LEGISLAÇÃO
URBANA DA CIDADE DE JUIZ DE FORA**

Juiz de Fora
2017

Leonardo Sanches

**PARAMETRIZAÇÃO E SISTEMAS GENERATIVOS COMO APOIO À TOMADA
DE DECISÕES EM PROJETOS DE ARQUITETURA APLICADOS À LEGISLAÇÃO
URBANA DA CIDADE DE JUIZ DE FORA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Ambiente Construído, da Universidade Federal de Juiz de Fora, como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Ambiente Construído. Área de Concentração: Arquitetura e Urbanismo.

Orientador: Prof. Dr. José Gustavo Francis Abdalla
Co-orientador: Prof. Dr. Klaus Chaves Alberto

Juiz de Fora
2017

Ficha catalográfica elaborada através do programa de geração automática da Biblioteca Universitária da UFJF, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Sanches, Leonardo.

Parametrização e sistemas generativos como apoio à tomada de decisões em projetos de arquitetura aplicados à legislação urbana da cidade de Juiz De Fora / Leonardo Sanches. -- 2017.

107 p.

Orientador: José Gustavo Francis Abdalla

Coorientador: Klaus Chaves Alberto

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia. Programa de Pós Graduação em Ambiente Construído, 2017.

1. BIM. 2. Parametrização. 3. Sistemas generativos. 4. Legislação urbana. 5. Juiz de Fora. I. Abdalla, José Gustavo Francis, orient. II. Alberto, Klaus Chaves, coorient. III. Título.

Leonardo Sanches

**PARAMETRIZAÇÃO E SISTEMAS GENERATIVOS COMO APOIO À TOMADA
DE DECISÕES EM PROJETOS DE ARQUITETURA APLICADOS À LEGISLAÇÃO
URBANA DA CIDADE DE JUIZ DE FORA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Ambiente Construído, da Universidade Federal de Juiz de Fora, como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Ambiente Construído. Área de Concentração: Arquitetura e Urbanismo.

Aprovada em 11 de maio de 2017.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. José Gustavo Francis Abdalla (Orientador)
Universidade Federal de Juiz de Fora

Prof. Dr. Klaus Chaves Alberto (Coorientador)
Universidade Federal de Juiz de Fora

Prof. Dr. Marcos Martins Borges
Universidade Federal de Juiz de Fora

Prof. Dr. Fernando Tadeu Araújo Lima
Universidade Federal de Juiz de Fora

Profa. Dr. Regina Coeli Ruschel
Universidade Estadual de Campinas

O Presidente da Banca atesta a
participação remota desta avaliadora.
Conforme art. 5, inc.IV
Resolução 04/2016-CSPP-UFJF

AGRADECIMENTOS

Se existe uma característica marcante desta pesquisa é o caráter solitário da programação, horas e horas de análise, fóruns e testes intermináveis. Neste cenário, a contribuição das pessoas que nos cercam é ainda mais marcante, por isso, agradeço imensamente a todos que de alguma forma contribuíram ao longo destes dois anos:

À minha família, pelo apoio incondicional desde sempre.

À Letícia Perani pela presença e carinho, e inclusive, pela contribuição direta para a realização do trabalho.

Ao meu orientador José Gustavo Francis Abdalla por aceitar este projeto, acreditar no trabalho e, claro, pelas conversas extra orientação que ampliaram meus horizontes no que diz respeito à arquitetura.

Aos professores do PROAC/UFJF pelos constantes estímulos intelectuais, em especial ao Klaus Chaves Alberto, meu coorientador, à Maria Aparecida Steinherz Hippert e ao Marcos Martins Borges, responsável direto por minha relação com os sistemas generativos de projeto.

Aos professores Regina Coeli Ruschel e Fernando Tadeu Araújo Lima pela participação na banca avaliadora e pelas contribuições que trouxeram para o trabalho.

Aos amigos/sócios Felipe Ribeiro e Henrique Gonçalves pelo apoio nestes anos de semi-afastamento das atividades do escritório.

Aos professores do Centro de Ensino Superior de Juiz de Fora (CES-JF) em especial à Aline Calazans e Aline Pimenta pela parceria e compreensão e, claro, à Renata Goretti por ser responsável por todas as primeiras oportunidades que tive nesta nova carreira.

Aos funcionários do PROAC/UFJF, Fabiano Vanon e Lília de Ávila, pelo apoio e dedicação nestes dois anos de pesquisa e aos colegas de turma que tornaram o caminho mais leve.

RESUMO

As transformações da sociedade proporcionadas pela tecnologia digital nos impelem a estudar quais seriam suas implicações no campo da arquitetura. Há algumas décadas, nota-se o impacto da adoção do desenho auxiliado por computador na apresentação e representação de projetos, no entanto, com as evoluções surgidas com os conceitos de BIM, parametrização e sistemas generativos, destaca-se, como campo para investigação, os possíveis usos destas ferramentas como apoio à tomada de decisões ao longo do processo de projeto. Neste contexto, esta pesquisa teve como objetivo o desenvolvimento de um algoritmo de projeto com base na legislação urbana, que possibilite explorar os meios, processos e conhecimentos necessários para sua criação, bem como as possíveis implicações de sua adoção como suporte ao projeto e simulação de ocupações urbanas. Para o recorte de estudo, foram selecionados os quatro parâmetros definidos pela legislação que podem ser caracterizados como os principais responsáveis pela geração da forma arquitetônica básica: coeficiente de aproveitamento, taxa de ocupação, gabarito e afastamentos. Em geral, os mecanismos utilizados pelas autoridades municipais apresentam semelhanças que permitem a abordagem de uma única cidade para um estudo exploratório, daí a concentração do estudo no Código de Obras da cidade de Juiz de Fora. A pesquisa foi realizada no Programa de Pós-graduação em Ambiente Construído da Universidade Federal de Juiz de Fora e pode ser caracterizada como aplicada e experimental. Neste tipo de pesquisa, os procedimentos metodológicos visam refazer as condições do fato a ser estudado, para observá-lo sob controle e desta forma demonstrar o modo como ele é produzido, bem como seus efeitos. O objeto de estudo foi definido como a aplicação da parametrização especificamente através da produção de um algoritmo de projeto. Como forma de observação, foi estabelecida uma abordagem objetiva de seus resultados através da validação numérica e visual das soluções obtidas com a ferramenta digital em comparação com os métodos convencionais. Por fim, como situação de controle, foram definidos um terreno base e uma área da cidade a partir dos quais seriam realizados os ensaios com o algoritmo. Uma contribuição da pesquisa é explorar a criação e aplicação de novas ferramentas digitais, buscando estabelecer a base para futuros estudos voltados para de automação de tarefas ao longo do processo de projeto arquitetônico. Como resultado, foi possível analisar o desenvolvimento do algoritmo e seu uso em relação: ao ambiente legal, abordando a automatização das operações de adequação; ao produto, com as especificidades do desenvolvimento para terrenos individuais e em conjunto; ao processo de criação do algoritmo, através das implicações da adoção de soluções lógicas para a produção arquitetônica; à usabilidade, com foco na relação usuário-rhinos-grasshopper e, por fim, as limitações encontradas ao longo do processo de desenvolvimento. Com o uso do algoritmo em uma situação real foram identificados possíveis pontos fortes e fracos deste tipo de sistema. Destaca-se como ponto positivo que, a partir do reconhecimento das restrições legais e de uma abordagem sistematizada de solução de problemas, pode-se conseguir que a ação criativa permaneça nas mãos do arquiteto, mas que a parte repetitiva do trabalho seja automatizada. Como ponto negativo, constatou-se a complexidade de se traduzir um problema, em geral, tratado de forma subjetiva e aberta, em uma sequência finita de processamentos que transformam diversos inputs em uma única saída, um volume tridimensional. Além da natureza subjetiva do problema, a própria mecânica de programação do algoritmo requer um desenvolvimento específico, visto que, apesar do computador ser parte importante do processo de projeto, o ensino de computação nos cursos de arquitetura está voltado para uso de ferramentas e não para sua programação.

Palavras-chave: BIM, Parametrização, Sistemas generativos, Legislação urbana, Juiz de Fora/MG

ABSTRACT

A scenario where the digital technology considerably transformed society impels us to study its implications on the field of architecture. In the last decades, the computer aided design impact on the AEC industry is clearly noted, especially in the drawing and presentation tools. However, with BIM, parameterization and generative systems, the application of CAD tools as an active support for decision making in the design process, presents itself as a theme for investigation. In this context, this research had as main goal to develop a design algorithm based on urban legislation allowing the exploration of the means, processes and knowledge required for its creation, as well as the possible implications of its adoption as a design support and simulations. The study limits are set on four regulations' parameters characterized as the main responsible for basic architectural form creation: (1) land use coefficient, (2) occupation rate, (3) maximum height and (4) required distance from site limits. In Brazil, usually, city authorities use similar parameters as building's design constraints, hence this study focus on the regulations presented by the city of Juiz de Fora/MG. This research was developed within the Graduate Program in Built Environment at Federal University of Juiz de Fora (PROAC/UFJF) and it can be categorized as applied and experimental. The methodological approach in this type of study seeks to replicate the conditions of a fact, doing so, it aims to observe it under control, and thus, to demonstrate how it is produced, as well as its effects. The object of research was set as the application of parameterization specifically through a design algorithm development. As an observation method, numerical and visual validation of solutions in comparison to conventional methods was taken as an objective approach to the results of the digital tool. Finally, a generic site and a city portion were set as a control situation to perform tests with the algorithm. The research contribution is in exploring the creation and application of new digital-based tools, seeking to establish the basis for future studies aimed at tasks automation throughout architectural design process. The algorithm development and its use were analyzed in five topics. The (1) legal standards, addressing the legal adjustment process automation. (2) Product, with specific requirements for individual sites and city portions; the (3) algorithm coding process, addressing the implications of using logical solutions for architectural production. (4) Usability, focusing on the user-rhinoceros-grasshopper interface and, finally, the (5) limitations encountered throughout the coding process.

Keywords: BIM, Parametricism, Generative Systems, Urban Regulations, Juiz de Fora/MG

LISTA DE FIGURAS

Figura 01 – Projeto como uma busca direcionada ao objetivo	31
Figura 02 – Fluxograma de geração de estudos de massa – torre.....	49
Figura 03 – Fluxograma de geração de estudos de massa – base	50
Figura 04 – Mapa de grupos do algoritmo	55
Figura 05 – Conexões entre os grupos	56
Figura 06 – Entrada de dados do ambiente	57
Figura 07 – Entrada de dados do legislação	57
Figura 08 – Entrada de dados do produto	58
Figura 09 – Loop de seleção ordenada de terrenos	59
Figura 10 – Dados iniciais	60
Figura 11 – Reconhecimento do ambiente	61
Figura 12 – Fluxograma da definição da área dos pavimentos das torres	62
Figura 13 – Cálculos de área privativa	63
Figura 14 – Forma do embasamento	64
Figura 15 – Forma da torre	65
Figura 16 – Topografia	66
Figura 17 – Relatórios	67
Figura 18 – Formato do terreno de estudo	70
Figura 19 – Ensaios realizados para diferentes modelos de ocupação – versão 1.0	71
Figura 20 – Ensaios realizados para diferentes modelos de ocupação – versão 1.1	71
Figura 21 – Ensaios realizados para diferentes modelos de ocupação – versão 1.2	72
Figura 22 – Área escolhida para testes do algoritmo	73
Figura 23 – Comparação de resultados	75
Figura 24 – área selecionada para simulação	76
Figura 25 – Área selecionada para simulação	77
Figura 26 – Área selecionada para simulação – modelos de ocupação	78
Figura 27 – Área selecionada situação atual com ocupação máxima	79
Figura 28 – Área selecionada simulação 01 – modelo de ocupação M4A	79
Figura 29 – Área selecionada simulação 01 – modelo de ocupação M8A	80
Figura 30 – área selecionada simulação 03 – modelo de ocupação M5A – opção 01	80
Figura 31 – área selecionada simulação 04 – modelo de ocupação M5A – opção 02	81
Figura 32 – Área selecionada simulação 01 – inconsistências	82
Figura 33 – Componentes e conectores	85
Figura 34 – Área de trabalho completa do algoritmo de projeto	86
Figura 35 – Organização da área de trabalho do algoritmo de projeto	87
Figura 36 – Fluxograma da definição da caixa da rua	88

LISTA DE QUADROS

Quadro 01 - Busca em português	24
Quadro 02 - Busca em inglês	25
Quadro 03 – Principais fontes	26
Quadro 04 – Obras mais referenciadas	27
Quadro 05 – Número de obras citadas de cada autor	28
Quadro 06 – Principais fontes	29
Quadro 07 – classificação dos parâmetros utilizados pela legislação urbana	47
Quadro 08 – Características do sítio e do produto	47
Quadro 09 – Parâmetros e operações	48
Quadro 10 – Grupos utilizados	51
Quadro 11 – Inputs, outputs e processamentos identificados	68
Quadro 12 – Dados do terreno e do produto utilizados para o ensaio	70
Quadro 13 – Dados do estudo para o modelo M8A sem limitação de gabarito	74
Quadro 14 – Modelos de ocupação	78
Quadro 15 – Normas Edilícias (Lei Municipal nº 6909) e considerações referentes à parametrização	98
Quadro 16 – Ordenamento do uso e ocupação do solo (Lei Municipal nº 6910) e considerações referentes à parametrização	101
Quadro 17 – Modelo de ocupação (Lei Municipal nº 6910) e considerações referentes à parametrização	102
Quadro 18 – Modelos de ocupação segundo o código de obras de Juiz de Fora	104

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 01 – Número de publicações ano a ano	26
Gráfico 02 – Número de publicações por período	29

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
1.1. OBJETO DE ESTUDO E JUSTIFICATIVA	12
1.2. DEFINIÇÃO DO PROBLEMA	14
1.3. OBJETIVO GERAL E OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
1.4. DELIMITAÇÕES DA PESQUISA	15
1.5. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	17
2. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS E ETAPAS DE PESQUISA	18
2.1. O PROCESSO DE REVISÃO DE LITERATURA	19
2.2. O PROCESSO DE ANÁLISE DA LEGISLAÇÃO	20
2.3. A SELEÇÃO DOS SOFTWARES A SEREM UTILIZADOS	22
2.4. PROCESSO DE DESENVOLVIMENTO DO ALGORITMO	23
3. ABORDAGEM TEÓRICO CONCEITUAL PARA A INVESTIGAÇÃO	23
3.1. O PANORAMA DAS PESQUISAS SOBRE SISTEMAS GENERATIVOS DE PROJETO ATRAVÉS DE UMA REVISÃO SISTEMÁTICA DE LITERATURA (RSL)	23
3.1.1. Aplicação	24
3.1.2. Resultados da busca	25
3.1.3. Considerações sobre a RSL	29
3.2. REVISÃO DE LITERATURA PARA A DISSERTAÇÃO	30
3.2.1. Processo de projeto em arquitetura	31
3.2.2. Evolução do CAD	32
3.2.3. BIM	34
3.2.4. Parametrização	37
3.2.5. Sistemas generativos	40
3.2.6. Algoritmos genéticos (GA)	42
3.2.7. Aplicações práticas do BIM, parametrização e SG no processo de projeto	43

4. ANÁLISE DA LEGISLAÇÃO DA CIDADE DE JUIZ DE FORA	46
5. DESENVOLVIMENTO DO ALGORITMO	52
5.1. CONSIDERAÇÕES SOBRE A PESQUISA E A PROGRAMAÇÃO	53
5.2. CONSTRUÇÃO DO ALGORITMO E HISTÓRICO DE VERSÕES	54
5.3. DESCRIÇÃO DO ALGORITMO DE PROJETO	54
5.3.1. Grupo entrada de dados	56
5.3.2. Grupo loop de seleção ordenada de terrenos	59
5.3.3. Grupo dados iniciais	60
5.3.4. Grupo reconhecimento do ambiente	60
5.3.5. Grupo cálculos de áreas privativas	61
5.3.6. Grupo forma do embasamento	63
5.3.7. Grupo forma da torre	64
5.3.8. Grupo topografia	66
5.3.9. Grupo relatórios	66
5.3.10. Comentários	68
6. SIMULAÇÕES	69
6.1. TERRENOS INDIVIDUAIS	69
6.2. CONJUNTOS DE TERRENOS	72
6.3. APLICAÇÃO PARA SIMULAÇÃO DO ESPAÇO URBANO	76
6.3.1. Área selecionada	76
6.3.2. Simulações	79
6.3.3. Considerações sobre o uso do algoritmo	81
7. ANÁLISE	82
8. CONSIDERAÇÕES FINAIS	89

REFERENCIAS	92
APÊNDICES	97
APÊNDICE 1 – Normas Edilícias, ordenamento do uso e ocupação do solo, modelos de ocupação e considerações referentes à parametrização	98
ANEXOS	103
ANEXO 1 – Normas Edilícias da cidade de Juiz de Fora	104
GLOSSÁRIO	105

1. INTRODUÇÃO

1.1. OBJETO DE ESTUDO E JUSTIFICATIVA

“Primeiro estranha-se depois entranha-se”

Fernando Pessoa

O fascínio exercido pela tecnologia digital, que surge com as transformações por ela proporcionadas nas últimas décadas em diversos campos do conhecimento, serve de impulso à exploração de suas aplicações no campo da arquitetura. Se seu impacto nos meios e métodos de representação foram significativos ao longo do tempo, sua aplicação como suporte às ações de projeto de forma direta, como a parametrização e os sistemas generativos, ainda pode ser explorada. Para compreender sua real contribuição é necessário experimentar, ensaiar e praticar, seja através de métodos ou ferramentas desenvolvidas com o objetivo de integrar os processos humanos aos digitais.

Segundo Castells (2010), vive-se um momento histórico de transformação nas bases materiais da economia, sociedade e cultura semelhante ao que se verificou durante à Revolução Industrial. Se naquele período, as novas fontes de energia, sua geração e distribuição foram os principais impulsos para as mudanças, hoje, aponta-se que seu cerne é o processamento de informações, não centrado no conhecimento em si, mas em sua aplicação para gerar conhecimentos e dispositivos de processamento/comunicação, completando, assim, um *loop* cumulativo entre inovação e uso de tais inovações (CASTELLS 2010).

Se a substituição da ferramenta manual pela máquina, ou seja, a passagem da energia humana para mecânica, marcou o início da Revolução Industrial, que em última instância nos trouxe à arquitetura Moderna, como apontado por Benévolo (2006); e se, além disso, o crescimento demográfico que se seguiu causou transformações na sociedade, que refletidas no espaço urbano foram responsáveis pelo que Choay (2005) classifica como pré-urbanismo, deve-se imaginar qual será o futuro da arquitetura e do pensamento urbano com as transformações tecnológicas ocorridas nas últimas décadas, qual será o impacto da integração crescente da tecnologia digital com o projeto, ou mesmo, como o suporte oferecido pelo processamento de informações pode contribuir para o desenvolvimento do processo de produção de espaços.

Neste contexto, o panorama da Arquitetura e do Urbanismo tem se modificado em função da integração cada vez maior com as ferramentas digitais, quer sejam estas de desenvolvimento ou de representação de projetos. Para Howell e Batcheler (2005), as aproximações iniciais entre

projeto e *Computer Aided Design* (CAD) estavam relacionadas à substituição das ferramentas de desenho, ainda que mantendo as lógicas de representação existentes. Em um segundo momento, com o desenvolvimento das ferramentas 3D o CAD passou a se focar na visualização do objeto arquitetônico. A partir de então, com a evolução dos modelos 3D, surge o conceito de *Building Information Modeling* (BIM) que, para Eastman et al. (2011, p.16), seria “uma tecnologia de modelagem e seus devidos processos associados com o objetivo de produzir, comunicar e analisar modelos e edificações”. Estes modelos são o conjunto dos componentes do edifício e seus comportamentos específicos, bem como uma série de dados consistentes, coordenados e não redundantes. Andrade e Ruschel (2011), destacam que sua aplicação passa pelo projeto, construção e operação do edifício durante seu ciclo de vida. Em síntese, com base na interoperabilidade entre ferramentas e agentes, este processo busca transformar o modelo tridimensional na peça central do desenvolvimento do projeto concentrando todas as informações agregadas ao longo do processo e sendo fonte da documentação necessária para sua execução.

As transformações proporcionadas pelo BIM, extrapolam a simples aceleração dos processos de representação. Azhar (2011) destaca, como vantagens desta integração, a possibilidade de ferramentas de visualização mais adequadas, melhor controle de custos e melhorias nos processos de gerenciamento, entre outros. Para o autor, esta tecnologia pode contribuir para a produção de projetos de maior qualidade, ao passo em que várias soluções podem ser testadas e simulações podem ser feitas de forma mais rápida.

Para Issa et al. (2009), um campo promissor da tecnologia BIM é a simulação, visto que ela permite maior exploração e refinamento do projeto da construção e, mesmo, da operação das edificações. No caso do ambiente urbano, além da exploração espacial das opções de projeto, este tipo de sistema pode fornecer dados complementares para o planejador urbano, população, fluxo de veículos, infraestrutura necessária, entre outros podem ser utilizados como subsídio para melhores soluções de projeto.

Com isso, apontam-se justificativas para a criação de ferramentas digitais capazes de fornecer suporte à experimentação e às simulações. O desenvolvimento de tais ferramentas se apoia em um dos componentes do sistema BIM, o desenho paramétrico. Este, para Henriques e Bueno (2010), “corresponde à codificação de um conjunto de regras ou relações lógicas, geométricas e paramétricas, numa determinada sequência, para resolver um determinado problema”. Howell e Batcheler (2005, p.1) destacam que esta forma de projetar adiciona inteligência aos objetos, “permitindo a representação de geometrias complexas e relações funcionais entre componentes do edifício”.

Visto isso, passa-se à exploração da parametrização e dos sistemas generativos como apoio ao projeto, com o objetivo de agrupar normas e regulamentações em uma fonte de informações completa e adaptável. Criar um ambiente tridimensional capaz de oferecer respostas volumétricas às necessidades referentes à legislação urbana pode contribuir tanto para o desenvolvimento de edifícios mais eficientes e seguros quanto para simulações mais rápidas e completas do espaço urbano.

Ressalta-se que a pesquisa desenvolvida, não aborda todos os conceitos presentes no BIM, porque tem como foco, atuar na essência deste sistema, que pode ser verificada nos próprios termos utilizados para sua designação em língua portuguesa, Modelagem da Informação da Construção, visto que a ferramenta tem como premissa, reunir, em um modelo tridimensional, as informações relativas às restrições legais ao projeto da edificação.

1.2. DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

Ao analisar o que Lawson (2011) apresenta quando discorre sobre as restrições às quais o projetista está submetido, pode-se compreender que o profissional de arquitetura, no desempenho do seu trabalho, se posiciona como mediador entre os interesses dos clientes e as exigências legais em uma ação ponderada por suas próprias crenças do que seria uma boa arquitetura. Destes três pontos de vista (arquiteto, clientes e autoridades legais), o único que se apresenta sem possibilidades de mudança imediata é a legislação, o que a torna a origem dos parâmetros com interferência mais clara e direta ao longo do processo de projeto (LAWSON, 2011).

Genericamente, ao se analisar os códigos de edificações ou urbanização das prefeituras de Juiz de Fora, Rio de Janeiro e Belo Horizonte, no que é referente aos projetos de arquitetura, nota-se que as decisões precisam ser validadas por uma série de operações e adequações que seguem padrões repetitivos, e que são baseados em parâmetros legais definidos de forma relacionada. Tais parâmetros são definidos, em geral, pela localização do terreno e pelo uso pretendido e se aplicam em função de características do sítio – tamanho e forma do terreno –, e características do produto – programa ou a tipologia adotada.

Como se vê, o processo de adequação à legislação se caracteriza como um problema sem uma solução única, mas que percorre um caminho bem definido, algo que se assemelha ao conceito de algoritmo apresentado por Terzidis (2006, p.15). Segundo o autor, um algoritmo é a “codificação de um problema através de uma série de passos finita, consistente e racional”.

De uma forma geral, as proposições lógicas dos algoritmos são desenvolvidas como um caminho definido em direção a uma solução específica, isto é, são processos com um fim determinável. Existe, ainda, a possibilidade de se desenvolver algoritmos como meio gerador de soluções para um problema, desde que este possa ser apresentado de forma lógica (TERZIDIS, 2006, p.15). Com foco neste segundo caso, se tem a possibilidade de automatizar a aplicação dos parâmetros legais ao longo do processo de projeto, assim, tem-se como consequência esperada, maior velocidade no teste das soluções a serem experimentadas pelo arquiteto e, naturalmente, maior condição de avaliação e análise de proposições.

Apesar dos mecanismos de controle apresentados pelas legislações municipais serem relativamente semelhantes, por se tratar de uma experimentação inicial, optou-se por uma abordagem local, explorando a legislação atual da cidade de Juiz de Fora como base de dados para o desenvolvimento de uma ferramenta de parametrização que permite de gerar estudos volumétricos a partir de parâmetros legais.

1.3. OBJETIVO GERAL E OBJETIVOS ESPECÍFICOS

O objetivo geral desta pesquisa é o desenvolvimento de um algoritmo de projeto com base na legislação urbana, que possibilite explorar os meios, processos e conhecimentos necessários para sua criação, bem como as possíveis implicações de sua adoção como suporte ao projeto e simulação de ocupações urbanas.

Como objetivos específicos, tem-se:

- (1) Analisar a legislação urbana de Juiz de Fora e com isso estabelecer os parâmetros a serem utilizados para o desenvolvimento da ferramenta de parametrização.
- (2) Produzir um algoritmo experimental capaz de gerar estudos de massa como parte integrante do processo de avaliação e análise de projeto da edificação.
- (3) Simular a ocupação de terrenos individuais e regiões da cidade como parte do teste do algoritmo desenvolvido
- (4) Desenvolver uma análise crítica dos resultados obtidos com o algoritmo, no sentido de avaliar a viabilidade da adoção deste sistema e indicar encaminhamentos de pesquisas.
- (5) Desenvolver uma análise crítica do processo de desenvolvimento do algoritmo.

1.4. DELIMITAÇÕES DA PESQUISA

Pelo campo de estudo já anunciado na introdução, foi estabelecido como recorte da pesquisa a cidade de Juiz de Fora e quatro parâmetros exigidos pela legislação: (1) coeficiente de aproveitamento, (2) taxa de ocupação, (3) gabarito e (4) afastamentos.

Tal proposição se justifica, visto que, em geral, os mecanismos utilizados pelas autoridades municipais apresentam semelhanças que permitiram a abordagem de uma única cidade para um estudo exploratório. O mesmo se repete para os parâmetros selecionados, além disso, estes podem ser caracterizados como os principais responsáveis pela geração da forma arquitetônica básica.

Juiz de Fora contava com 516.247 habitantes no ano de 2010 e, desde então, estima-se que tenha ocorrido um crescimento populacional de 7,5% (IBGE, 2016). A cidade se caracteriza como polo econômico da Zona da Mata Mineira, uma região com aproximadamente um milhão e meio de habitantes, e com isso, pode ser considerada uma das principais cidades do interior de Minas Gerais. Segundo dados da Fundação João Pinheiro, o déficit habitacional local, ou seja, a necessidade de construção de moradias, é o quarto maior do estado e seria de dezesseis mil moradias em 2010 (FUNDAÇÃO JOÃO PINHEIRO, 2015).

No que diz respeito à legislação urbana, Juiz de Fora tem um histórico de aproximadamente 120 anos de regulamentação. A Resolução nº 374/1896 determinava as primeiras exigências para construções na cidade, e mesmo que ainda mais voltadas para aspectos sanitários, como locação de latrinas e encanamentos de esgoto, nela já foram definidas as primeiras limitações da taxa de ocupação, recuo posterior e altura dos pavimentos. Depois de pequenos ajustes com a Resolução nº 902/1923, em 1938 foi promulgado o decreto-lei nº 23 aprovando o Código de Obras do Município de Juiz de Fora, que foi a regulamentação vigente até o final da década de 1980, ainda que com muitas alterações. Neste momento, ainda não havia limitações de altura máxima ou coeficiente de aproveitamento, no entanto, passam a ser exigidos o recuo frontal e os afastamentos laterais, assim como parâmetros de ventilação e iluminação. No ano de 1956 a Lei nº 864/1956 passou a adotar a limitação de altura através do gabarito máximo igual a duas vezes a caixa da rua (CARDOSO, 2015). Até aquele momento, tais limites estavam ligados a questões técnicas e não legais.

Em 1986, foi promulgada a Legislação Urbana Básica da cidade, composta por três leis que dispõem sobre o parcelamento do solo (Lei nº 6.908/1986), sobre as edificações na cidade (Lei nº 6.909/1986), e sobre o ordenamento do uso e ocupação do solo (Lei 6.910/1986) (CARDOSO, 2015). Através desta regulamentação, os parâmetros de ocupação foram

sistematizados em uma série de classificações, inicialmente em Unidades Territoriais, depois em zonas de uso e por fim em 13 modelos de ocupação específicos que variam de M1 a M8A. Tais parâmetros variam gradativamente os valores de potencial construtivo, taxa de ocupação e coeficiente de aproveitamento. A partir deste momento, a limitação de gabarito passa também a somar o recuo frontal das edificações (PREFEITURA DE JUIZ DE FORA 1986A; 1986B).

A legislação de 1986 continua vigente atualmente, porém, houve uma modificação significativa no texto desta lei em 2013. Os decretos nº 05 e nº 06 de 2013 ampliam a altura máxima permitida, promovem ajustes referentes às permissões para uso do embasamento e modificam o sistema de dimensionamento de garagens e o cálculo de ventilação e iluminação. Com a legislação atual, foram também apresentadas diversas mudanças referentes aos modelos de ocupação existentes, e hoje passam a existir possibilidades diferentes de coeficiente de aproveitamento para um mesmo modelo de ocupação em função do número de vagas para automóveis disponíveis para cada unidade (PREFEITURA DE JUIZ DE FORA 2013A; 2013B). Sabendo-se que, para o desenvolvimento do algoritmo apresentado neste trabalho, foram utilizados os parâmetros exigidos na regulamentação vigente, considerando as mudanças acima citadas.

Para a definição dos parâmetros legais a serem adotados na criação do algoritmo, foram estudados os códigos de edificações das cidades de Juiz de Fora (como citado acima), Rio de Janeiro (Lei Complementar nº 31/2013) e Belo Horizonte (Lei nº 7.166/96 com alterações introduzidas pela Lei nº 9.959/10). Com esta análise, pode-se verificar a semelhança no que diz respeito à geração de áreas construídas e as limitações aos objetos arquitetônicos. Nos três casos, coeficiente de aproveitamento, taxa de ocupação, gabarito e afastamentos são utilizados. Com isso, mesmo em se tratando de uma abordagem local, pode-se ter uma aproximação do que seria o processo para diferentes regiões.

1.5. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação foi estruturada em capítulos que podem ser organizados em cinco partes. Na primeira parte, estão a introdução que apresenta o trabalho, os procedimentos metodológicos e as etapas de pesquisa; tais etapas, por sua vez, detalham os processos utilizados para revisão bibliográfica, análise da legislação, desenvolvimento do software e análise dos resultados obtidos.

A segunda parte procura verificar a situação atual das pesquisas relacionadas BIM, parametrização e sistemas generativos no Brasil. Em seguida é feita uma revisão bibliográfica

e a análise da legislação de Juiz de Fora. Nesta parte, procura-se compreender as exigências legais presentes no código de obras que podem ser traduzidas em parâmetros para a geração de formas arquitetônicas a partir de algoritmos e estabelecer o contexto teórico do BIM.

A terceira parte relata o desenvolvimento do algoritmo, detalhando fluxos de entrada, fluxos de saída e processamentos com o objetivo de apresentar as necessidades específicas para sua programação. A quarta parte procura verificar o algoritmo desenvolvido bem como estabelecer sua contribuição para o processo de projeto, e suas possibilidades de aplicação para o espaço urbano. Tratam-se das simulações realizadas com o objetivo de apresentar os resultados obtidos com o algoritmo desenvolvido ao longo da pesquisa explorando, tanto sua aplicação para terrenos específicos, quanto da simulação de ocupação de espaços da cidade, procurando verificar sua utilidade para possíveis estudos de ocupação, insolação e ventilação entre outros.

Complementando o trabalho, na quinta parte, procura-se traçar uma análise crítica do processo desenvolvido durante a pesquisa, e promover uma reflexão acerca da validade da adoção de formas de automação baseadas nas exigências legais como suporte ao processo de projeto.

2. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS E ETAPAS DE PESQUISA

A pesquisa para esta dissertação foi desenvolvida junto ao Programa de Pós-Graduação em Ambiente Construído da Universidade Federal de Juiz de Fora (PROAC/UFJF). Sua contribuição é explorar a criação e aplicação de novas ferramentas baseadas na tecnologia digital ao procurar estabelecer bases para futuras pesquisas voltadas para a automação de processos ao longo dos projetos de arquitetura.

De acordo com a classificação proposta por Prodanov e Freitas (2013), esta pesquisa se configura como *aplicada*, *experimental*, *qualitativa* e *explicativa*. Ela é *aplicada* do ponto de vista de sua natureza, pois “objetiva gerar conhecimentos para aplicação prática dirigidos à solução de problemas específicos” (PRODANOV E FREITAS, 2013, p.51), adotando uma abordagem *qualitativa*. Ao procurar compreender o processo de desenvolvimento de uma ferramenta de projeto e as implicações de sua adoção, por meio de simulações, pode ser qualificada como *experimental*, no que diz respeito aos procedimentos. Por fim, quanto a seus objetivos, esta se apresenta como *explicativa*, pois se baseia nos registros do desenvolvimento

de um algoritmo de projeto e procura estabelecer uma análise do processo, desde as ações necessárias para seu desenvolvimento até seus resultados em comparação com projetos reais.

Para Prodanov e Freitas (2013), neste tipo de pesquisa, o pesquisador procura refazer as condições de um fato a ser estudado, para observá-lo sob controle e desta forma demonstrar o modo como um fato é produzido, bem como seus efeitos. Neste caso, os autores indicam a designação direta de um objeto de estudo, um modo de observação e uma situação de controle. O objeto de estudo foi definido como a aplicação da parametrização especificamente através da produção de um algoritmo de projeto. Como forma de observação, foi estabelecida uma abordagem objetiva de seus resultados através da validação numérica e visual das soluções obtidas com a ferramenta digital em comparação com os métodos convencionais. Por fim, como situação de controle, foram definidos um terreno base e uma área da cidade a partir dos quais seriam realizados os ensaios com o algoritmo,

2.1. O PROCESSO DE REVISÃO DE LITERATURA

A partir da definição do universo da pesquisa e do recorte a ser abordado, foram realizados dois tipos de revisão de literatura: narrativa e sistemática. A revisão narrativa, que ocorre por processos não metódicos, sabido que ela se dá por conhecimentos e investigações extra base de dados, contribuiu principalmente para a aproximação inicial ao tema, trazendo conceitos e palavras chaves que posteriormente serviram de base para a Revisão Sistemática de Literatura (RSL).

A RSL é uma técnica regular desenvolvida a partir de uma declaração clara da finalidade da revisão e de uma busca abrangente em bases de dados através de critérios explícitos de elegibilidade. Pautada no rigor metodológico, em etapas seguintes, este tipo de revisão bibliográfica, traça uma avaliação crítica dos estudos primários se utilizando de critérios objetivos e reprodutíveis de seleção e qualificação da amostra de pesquisas consideradas relevantes (COOK, 1997:350 e HIGGINS E GREEN, 2011).

Para os critérios de avaliação dos resultados são definidos na fase de preparação da pesquisa e estão diretamente ligados às perguntas realizadas. Em geral, a seleção da amostra de interesse se dá em várias etapas, que podem se utilizar de critérios como: títulos, resumos ou palavras-chaves. Em fases posteriores, passam a ser analisados os textos como um todo e mesmo documentos marginais (BRERETON, BUDGEN E KITCHENHAM, 2016).

Assim como os critérios de seleção, os dados a serem extraídos do estudo, também são definidos em função das perguntas da pesquisa. Brereton, Budgen e Kitchenham (2016),

apresentam como exemplos de dados obtidos, entre outros, metodologias aplicadas nos estudos e investigações; resultados alcançados; principais resultados, além de autores das publicações, citados e presentes nas referências bibliográficas.

Ao utilizar este método de pesquisa, buscou-se delinear o contorno de um problema de pesquisa; buscar principais agentes, publicações, métodos e técnicas, além de direcionamentos para trabalhos acadêmico-científicos.

A RSL apresentadas nesta dissertação, por sua vez, teve como estratégia de busca, especificamente, o portal Periódicos CAPES, visto que este se trata da principal base de dados brasileira e funciona como ferramenta de busca em diversas outras bases de dados, tanto nacionais quanto internacionais, incluindo várias consideradas relevantes no que diz respeito ao tema em seus três vieses principais, arquitetura, urbanismo e tecnologia, como SciELO, *Directory of Open Acces Journals*, *ACM Digital Library*, *Applied Social Sciences Index and Abstracts (ASSIA)* e *Urban Studies Abstracts*.

Na fase de planejamento da pesquisa procurou-se estabelecer uma sequência de ações que pudessem de forma objetiva direcionar os esforços procurando garantir a eficiência do processo. Em um primeiro momento foram definidas as palavras chave bem como a sequência de sua aplicação, após esta fase foram previstos pré-testes para verificar a validade dos termos utilizados e estabelecer uma comparação entre os resultados obtidos em diversas bases de dados.

Com vistas a garantir a qualidade e confiabilidade do estudo em desenvolvimento procurou-se garantir que os critérios de inclusão e exclusão fossem apropriados, claros e de fácil aplicação e que o método de busca fosse capaz de cobrir todos os estudos relevantes sobre o tema, se utilizando de termos que conseguissem direcionar os resultados para o interesse da pesquisa, mas que ainda assim fossem o mais abrangentes possíveis

2.2. O PROCESSO DE ANÁLISE DA LEGISLAÇÃO

Após o estabelecimento das bases conceituais na fase de revisão bibliográfica, foi realizada uma extensa análise do código de obras de Juiz de Fora (leis municipais de número 6.909/1986 e 6910/86), levantando gabarito, coeficiente de aproveitamento, taxa de ocupação, pé direito, recuos e afastamentos, com o objetivo de compreender como a autoridade municipal regulamenta as construções na cidade (QUADRO 01).

A abordagem nesta etapa foi estruturada a fim de estabelecer os parâmetros de trabalho na dissertação, quais sejam: (1) os que influenciam diretamente na volumetria das edificações,

(2) como eles geram a forma arquitetônica, (3) quais são as limitações à esta forma e (4) que tipos de restrição devem ser aplicadas aos ambientes. Para além destes parâmetros, também foram verificadas quais são as áreas não consideradas pela legislação e que se caracterizam como bônus em relação ao potencial construtivo (5).

Os documentos analisados nesta fase foram definidos a partir das informações obtidas por meio de consulta direta¹ à Secretaria de Atividades Urbanas (SAU), órgão diretamente subordinado ao chefe do poder executivo que “articula e implementa as políticas de regulação urbana, de forma integrada, intersetorial e regionalizada, visando ao pleno cumprimento das funções sociais da cidade e da propriedade” (PREFEITURA MUNICIPAL DE JUIZ DE FORA, 2016). Suas competências envolvem, entre outras, o planejamento, coordenação e execução de políticas de regulação urbana, bem como a definição de políticas e programas relativos à área de atividades urbanas.

Os textos integrais das leis de referência, os quais se encontram listados abaixo, foram obtidos através da plataforma JF Legis, sendo a busca realizada a partir do número específico de cada instrumento legal.

- Lei 6.909 de 31 de maio de 1986: dispõe sobre as edificações no município de Juiz de Fora;²
- Lei 6.910 de 31 de maio de 1986: dispõe sobre o ordenamento do uso e ocupação do solo no município de Juiz de Fora;³
- Lei complementar 005/2013: altera a lei municipal nº 6.909 de 31 de maio de 1986.⁴
- Lei complementar 006/2013: altera a lei municipal nº 6.910 de 31 de maio de 1986.⁵

De uma forma geral, o objetivo desta etapa foi fornecer as bases necessárias para a construção de um algoritmo capaz de gerar estudos volumétricos explorando todo o potencial de um terreno de forma automatizada. Como produto final desta etapa tem-se uma série de descrições e fluxogramas de processamento criados para sistematizar as informações e estabelecer de forma clara entradas, saídas e processamentos a serem adotados. Tais elementos podem ser visto a seguir, no capítulo 4 desta dissertação.

¹ Entrevista concedida em 12/03/2015, por meio telefônico.

² Lei 6.909: http://www.jflegis.pjf.mg.gov.br/c_norma.php?chave=0000019208

³ Lei 6.910: http://www.jflegis.pjf.mg.gov.br/c_norma.php?chave=0000019210

⁴ Lei Complementar nº005: http://www.jflegis.pjf.mg.gov.br/c_norma.php?chave=0000036983

⁵ Lei Complementar nº006: http://www.jflegis.pjf.mg.gov.br/c_norma.php?chave=0000037014

2.3. A SELEÇÃO DOS SOFTWARES A SEREM UTILIZADOS

Uma linguagem de programação é um meio formal para expressar ideias, sendo assim, ela deve apresentar semelhanças com o pensamento humano, e como tal, apresentar (1) elementos primitivos, (2) mecanismos de combinação, e (3) mecanismos de abstração. As linguagens de programação podem ser visuais (VPL) – consistem de elementos figurativos que podem ser manipulados de acordo com alguma gramática espacial – ou textuais (TPL) – os programas são uma sequência linear de caracteres –, acredita-se que linguagens VPL são mais produtivas e interessantes para os iniciantes, por outro lado, as TPLs são mais indicadas para grande escala e problemas complexos (LEITÃO et al. 2012).

A escolha das ferramentas utilizadas foi direcionada para os principais softwares disponíveis para o desenvolvimento de formas através de algoritmos, mas também em função dos recursos disponíveis nos laboratórios e da interação com outros pesquisadores da instituição. Tendo em vista este cenário, foi selecionado o *software Rhinoceros* como modelador 3d, em conjunto com o *plug-in Grasshopper*, utilizado para editar graficamente os algoritmos de programação (VPL). Segundo Robert McNeel e Associates (2016), tal possibilidade faz com que a utilização do plug-in não requeira conhecimentos de programação. Além disso, tal escolha favorece a integração direta com programas frequentemente utilizados no Brasil para o desenvolvimento de projetos arquitetônicos, como ArchiCAD, AutoCad e Sketchup.

O Grasshopper consegue suplantiar as limitações de uma linguagem VPL através da possibilidade de criação de componentes específicos baseados em linguagem TPL, por mais que esta possibilidade requeira conhecimentos de programação textual, ela amplia as possibilidades de abordagem de problemas com alto grau de complexidade (LEITÃO et al. 2012). Sendo assim, devido à complexidade do problema a ser abordado, tal liberdade também justifica a escolha dos softwares adotados.

2.4. PROCESSO DE DESENVOLVIMENTO DO ALGORITMO

Para Almeida (2008), a produção de um algoritmo parte de uma organização do problema em três etapas: (1) entrada – dados indispensáveis para a solução de um problema –, (2) processamento – procedimentos para se chegar ao resultado – e (3) saída – resultado para problema. A formalização destas etapas se dá através de métodos de representação específicos; um deles, o escolhido para esta pesquisa, é o fluxograma, representação através de símbolos

geométricos convencionais, com os quais se expressa o raciocínio lógico com o qual se resolverá o problema (ALMEIDA, 2008:18).

A partir da análise da legislação de uso na pesquisa, os parâmetros usados para regulamentação das construções na cidade de Juiz de Fora foram organizados de acordo com suas funções e classificados em geração de formas, limitações, restrições e extras. Com isso, se buscou tornar claras as interferências de cada um dos itens na forma a ser gerada. Após esta etapa foram levantadas as operações requeridas para a definição da forma final a ser gerada pelo algoritmo com o objetivo de identificar o conjunto de fórmulas a serem utilizadas para sua programação. Por fim, foi feito um mapeamento do processo dos estudos de viabilidade, com o objetivo de estabelecer a sequência de operações a serem incluídas no algoritmo de programação.

3. ABORDAGEM TEORICO CONCEITUAL PARA A INVESTIGAÇÃO

3.1 O PANORAMA ATUAL DAS PESQUISAS SOBRE SISTEMAS GENERATIVOS DE PROJETO NO BRASIL ATRAVÉS DE UMA REVISÕES SISTEMÁTICAS DE LITERATURA (RSL)

A partir das informações obtidas com a revisão narrativa, foram determinadas as palavras chave “arquitetura”, “sistemas generativos” e “projeto algorítmico”, mantendo esta sequência de aplicação. Desta forma, a aproximação inicial se daria pelo campo mais amplo “arquitetura”, partindo para o campo restrito, “sistemas generativos” e, por fim, o direcionamento seria feito pelo método específico “projeto algorítmico”. Devido às características do tema abordado, fez-se necessário realizar pesquisas, também, em inglês, neste caso foram adotadas as tradução diretas dos termos selecionados anteriormente: “*architecture*” “*Generative design*”, “*algorithmic design*”.

Além da combinação das palavras chave, a seleção das publicações a serem estudadas foi prevista em duas etapas. Em um primeiro momento, a partir da análise dos títulos, foram selecionados os artigos considerados de interesse, ou seja, aqueles que demonstravam ter algum grau de conexão com o tema, ainda que de forma superficial. Em um segundo momento, a partir da análise dos resumos da amostra obtida na fase anterior, foram excluídas as publicações que não apresentavam conexão direta com o assunto em questão e, além disso, foram adotados como critérios de exclusão os casos a seguir: relatos de uma mesma pesquisa, impossibilidade de

acesso aos artigos completos, artigos voltados para desenvolvimento de elementos arquitetônicos ou equipamentos específicos.

Com base no método de pesquisa adotado por Kitchenham, B. et al. (2009), buscando traçar o panorama do tema abordado, foram planejadas questões a serem respondidas a partir da pesquisa. Tais questões são apresentadas a seguir:

- Q1. Como os estudos sobre Sistemas Generativos se distribuem ao longo do tempo?
- Q2. Quais os principais temas abordados?
- Q3. Quais as principais plataformas para publicação (periódicos e congressos)?
- Q4. Quais são as obras mais referenciadas?
- Q5. Quem são os principais autores?
- Q6. Quais os métodos adotados?
- Q7. Em geral o tema é explorado de forma teórica ou experimental?

3.1.1. Aplicação

A RSL foi realizada entre os dias 12 e 19 de setembro de 2016. Seguindo-se o aspecto da técnica, que parte do todo para o específico, inicialmente, foi estabelecido o seguinte conjunto de palavras chave: “sistemas generativos”, “Arquitetura” e “Projeto Paramétrico”. O número de publicações obtidas nas pesquisas em português foi relativamente baixo e as combinações utilizadas foram de no máximo duas palavras chave. Em geral, os resultados encontrados foram artigos publicados em diversas línguas e voltados para as áreas de medicina, linguística e ensino entre outros, com isso, não houve nenhum artigo considerado relevante (Quadro 01).

Quadro 01 - Busca em português

Descritores	Total	Interesse	Relevante	Observações
Sistema generativo	18	1*	0	Diversos artigos em outras línguas voltados para linguística ou medicina
Sistemas generativos	5	0	0	Artigos em outras línguas voltados para música, política, língua, economia, engenharia mecânica
Sistemas generativos + Arquitetura	1	0	0	Ensino
Projeto Algorítmico	7	0	0	Engenharia de software, ensino, telecomunicações, matemática, direito, dança
Projeto Algorítmico + Arquitetura	2	0	0	Direito, dança
* artigo italiano				

Fonte: autor

Ao se realizar a pesquisa na mesma base de dados, com as mesmas combinações de palavras, porém com os termos em inglês, os resultados foram consideravelmente mais amplos, tornando inviável a análise de todas as publicações encontradas. Devido a este volume de publicações encontradas, foi necessário aplicar uma sequência de filtros de até 2 termos buscando tornar a amostra de análise mais adequada ao período de estudo. Sendo assim, foram realizadas buscas utilizando as seguintes combinações: “*generative system + architecture*”, “*Generative design + architecture*” e “*Algorithmic design + architecture*”. Os resultados obtidos com este processo são apresentados abaixo (Quadro 02).

Quadro 02 - Busca em inglês

Descritores	Total	Interesse	Relevante	Observações
“generative system”	663	-	-	
“generative system” + architecture	19	5	4	Não foi possível obter 1 dos artigos
“Algorithmic design”	1.008			
“Algorithmic design” + architecture	38	10	9	Não foi possível obter 1 dos artigos e 1 deles já havia sido selecionado
“Generative design”	350			
“Generative design” + architecture	55	43	27	Não foi possível obter 5 dos artigos

Fonte: autor

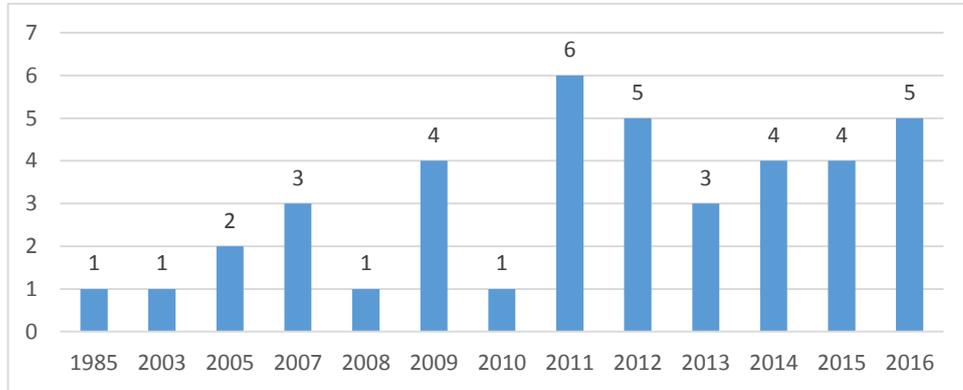
3.1.2. Resultados da busca

A partir seleção descrita anteriormente, para cada artigo foram coletados os dados da fonte de pesquisa (autores e coautores, publicação, instituição, país e ano), tema abordado, tipo de artigo (revisão de literatura, pesquisa prática), questão principal, resultados obtidos e aplicação prática. Por fim, foram analisadas as referências bibliográficas de cada artigo, buscando verificar autores, obras, periódicos relevantes, bem como aquelas que apresentavam relação direta com os sistemas generativos. Com base nos dados apresentados, devido à inexistência de publicações em português, a análise se concentrou na seleção realizada com termos em inglês.

Ao total foram selecionados 40 publicações e através da análise de cada uma delas foi possível identificar que apesar de uma publicação isolada de 1985, pode-se considerar que estas pesquisas surgem a partir de 2005 e se intensificam na década de 2010. Os anos com maior número de publicação são: 2011, com 6 publicações, 2012 e 2016 com 5 publicações. Dos artigos analisados 24 apresentavam alguma aplicação prática de sistemas generativos como

parte do estudo, sendo que destes, 19 tratavam diretamente da criação de tais sistemas (Gráfico 01).

Gráfico 01 – Número de publicações ano a ano



Fonte: autor

Em geral, os temas explorados em tais publicações poderiam ser agrupados em função de sua relação com a gramática da forma, sustentabilidade, reuso de soluções de projeto, melhoria da performance do edifício, multidisciplinaridade do edifício, condicionantes de projeto, restrições de projeto, eficiência no uso de recursos, conceitos de Christopher Alexander, design e gerenciamento de projetos urbanos, uso dos SG em tipologias específicas, além de 2 estudos pedagógicos que buscam avaliar formas de ensino ou a relação entre o uso do conhecimento desenvolvido em meios acadêmicos e o ambiente prático. Quanto às palavras chave atribuídas aos artigos, foram encontrados 140 termos que podem ser agrupados como se segue: processo de projeto (26%), sistemas generativos (23%), objeto arquitetônico (14%), projeto auxiliado por computador (11%), sustentabilidade (9%), educação (2%), ferramentas de projeto (2%) e outros (13%).

Quadro 03 – Principais fontes

Obras citadas	Publicações
8	international journal of architectural computing
7	Automation in Construction
5	Architectural Design
4	Nexus Network Journal

Fonte: autor

Ao se investigar as fontes dos textos selecionados, destacam-se os seguintes periódicos: International Journal of Architectural Computing (8 publicações), Automation in Construction (7 publicações), Architectural Design (5 publicações) e Nexus Network Journal (4 publicações) (QUADRO 03). Como visto anteriormente, as publicações em português não se mostraram significativas, no entanto, tanto Brasil (4 publicações) quanto Portugal (4 publicações) figuram entre os cinco principais países de origem das pesquisas analisadas, completam este grupo, EUA (6 publicações), Austrália (5 publicações) e Canada (5 publicações). Complementando a análise, verificou-se 34 autores diferentes, além destes, Luisa G. Caldas (UC Berkeley College of Environmental Design) e Christiane M. Herr (Xi'an Jiaotong-Liverpool University) se destacaram com três artigos cada.

Na parte final da análise, buscando identificar quais as limitações para estes estudos, passou-se a uma análise das referências bibliográficas de cada uma das publicações de interesse, a partir desta análise foram verificados 1159 publicações diferentes. Neste momento foram constatadas obras citadas de forma recorrente. A principal referência comum foi “Algorithmic Architecture” de Kostas Terzidis, publicado em 2006 e citado por 6 das 40 publicações analisadas. A seguir, com 5 referências, estão, “A Pattern Language: Towns, Buildings, Construction” de Christopher Alexander de 1977, “An Evolutionary Architecture” de John Frazer de 1995 e “Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence” de John Henry Holland, publicado em 1992 (QUADRO 04).

Quadro 04 – Obras mais referenciadas

Número de citações	Obra	Autor	Ano
6	Algorithmic Architecture	Terzidis, K.	2006
5	A Pattern Language: Towns, Buildings, Construction.	Alexander, C., Ishikawa, S., Silverstein, M.	1977
5	An Evolutionary Architecture	Frazer, J.	1995
5	Adaptation in natural and artificial systems : an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence	Holland, J. H.	1992
4	Notes on the synthesis of form	Alexander, C.	1964
4	Genetic algorithms in search, optimization and machine learning.	Goldberg D. E.	1989
4	Towards integrated performance-driven generative design tools	Shea, K., Aish, R. e Gourtovaia, M.	2005

Fonte: autor

Em uma análise dos autores com maior número de obras referenciadas, destacam-se: Luisa G. Caldas, William J. Mitchell, Terry W. Knight, George Stiny, Christiane M. Herr, Nigel Cross, Rivka Oxamn e, Kristina Shea e John S Gero. O número de obras publicadas por cada autor, encontrado nas referências analisadas é apresentado a seguir: (Quadro 05)

Quadro 05 – Número de obras citadas de cada autor

Obras citadas	Autor
16	Caldas, L.G.
12	Mitchell, William J
11	Knight, T. W.
11	Stiny, G.
10	Herr, Christiane M.
9	Cross, N.
9	Oxman Rivka
8	Shea, K.
7	Gero, J.S.

Fonte: autor

No que diz respeito às publicações que em maior número apareceram entre as referências analisadas, destacam-se: “Environment and Planning B: Planning and Design”, “Automation in Construction”, “Design Studies”, “Building and Environment”, “Energy and Buildings”, “Computer-Aided Design” e “Architectural Design”. Vale destacar, também, os eventos com maior número de obras referenciadas, que são: eCAADe (Education in Computer Aided Architectural Design in Europe), CAADRIA (Computer Aided Architectural Design Research in Asia), ACADIA (Association for Computer Aided Design in Architecture), CAADFutures (Computer-Aided Architectural Design Futures Foundation) e SIGGRAPH – (Special Interest Group on Computer GRAPHics and Interactive Techniques) (Quadro 06).

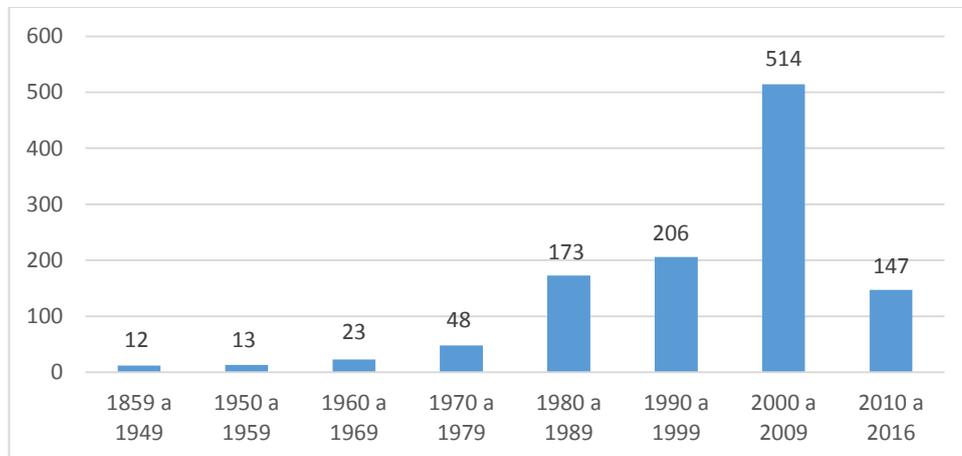
Do total de 1159 referências levantadas, foi possível identificar um aumento gradativo em números totais década a década nos últimos quarenta anos chegando a um pico de 514 publicações na década de 2000. Vale ressaltar que esta valor não reflete necessariamente apenas um aumento na exploração do tema, mas também uma outra série de fatores que necessitam de uma melhora análise, entre eles o próprio aumento do volume geral das publicações ao longo do tempo.

Quadro 06 – Principais fontes

	Obras	
Publicações	37	Environment and Planning B: Planning and Design
	36	Automation in Construction
	35	Design Studies
	19	Building and Environment
	17	Energy and Buildings
	15	Computer-Aided Design
	10	Architectural Design
Eventos	19	eCAADe, Conference on Education in Computer Aided Architectural Design in Europe
	18	CAADRIA - International Conference on Computer Aided Architectural Design Research in Asia
	7	ACADIA - Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture,
	7	CAADFutures (Computer-Aided Architectural Design Futures Foundation)
	7	SIGGRAPH – (Special Interest Group on Computer GRAPHics and Interactive Techniques)

Fonte: autor

Gráfico 02 – Número de publicações por período



Fonte: autor

3.1.3. Considerações sobre a RSL

Quanto ao método utilizado, a RSL se mostrou eficaz à medida em que estabeleceu um caminho consistente entre o universo geral e os resultados específicos. Com a sistematização da aplicação de palavras chave como filtros da pesquisa, foi possível compilar um conjunto de publicações que permitiu traçar o estado da arte do tema no Brasil.

Nesta análise realizada no portal de Periódicos CAPES, não foram verificadas publicações em língua portuguesa, ainda assim, foram encontrados pesquisadores brasileiros responsáveis por pesquisas significativas. No que diz respeito à atualidade do tema, a partir da análise das referências utilizadas pelos autores da amostra, verifica-se que, em geral, a busca pela identificação de uma lógica de geração de formas arquitetônicas é bastante antiga. No entanto, com o desenvolvimento das tecnologias digitais, o computador se tornou, possivelmente, uma ferramenta capaz de explorar esta possibilidade como nunca se viu anteriormente. Nota-se também, a tendência à exploração experimental do tema em detrimento de estudos apenas teóricos, seja através do desenvolvimento ou da aplicação de ferramentas voltadas para a geração de formas.

No que diz respeito às plataformas para divulgação de trabalhos, ao se levar em conta os periódicos nos quais os artigos selecionados foram publicados, quatro se destacam: “International Journal of Architectural Computing”, “Automation in Construction”, “Architectural Design” e “Nexus Network Journal”. Nas referências utilizadas por estes artigos, além dos periódicos acima, outros três também tiveram um alto número de publicações referenciadas: “Environment and Planning B: Planning and Design”, “Design Studies” e “Building and Environment”. Já no que diz respeito aos eventos de interesse, os mais significativos foram: eCAADe, CAADRIA, ACADIA, CAADFutures e SIGGRAPH.

Ainda pela RSL, verificou-se a importância das obras de Kostas Terzidis – *Algorithmic Architecture* –, Christopher Alexander – *A Pattern Language: Towns, Buildings, Construction* –, John Frazer – *An Evolutionary Architecture* – e John Henry Holland – *Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence* –. Como autores que mais produziram obras relacionadas ao tema pode-se citar Luisa G. Caldas, William J. Mitchell, Terry W. Knight e George Stiny.

3.2. REVISÃO DE LITERATURA PARA A DISSERTAÇÃO

A revisão bibliográfica a seguir, tem por objetivo traçar um referencial teórico dos temas relacionados ao objeto de estudo. Inicialmente será apresentada a evolução do projeto auxiliado por computador (CAD), buscando demonstrar a forma como esta tecnologia se insere no campo de trabalho do arquiteto. Posteriormente, serão discutidos os conceitos de BIM, Parametrização, Sistemas Generativos de Projeto e Algoritmos genéticos, visando explorar a aplicação destas novas ferramentas no processo de projeto em arquitetura.

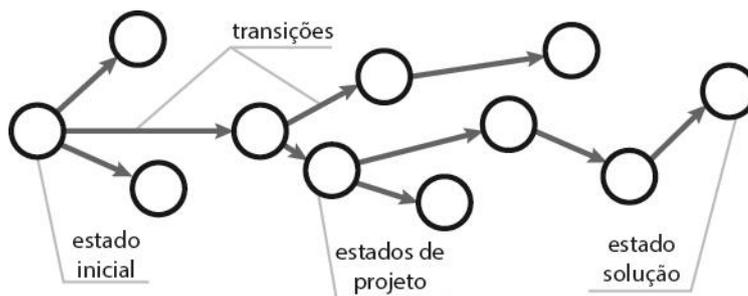
3.2.1. Processo de projeto em arquitetura

Na busca pela integração de um sistema baseado no BIM como suporte às decisões de projeto, através da parametrização e dos sistemas generativos, é interessante discutir o processo de projeto como um todo, bem como as implicações da adoção deste sistema em diferentes fases do design.

De forma genérica, “projetar é um ato intencional, dirigido a elaboração de artefatos ou ambientes que atingem determinadas metas respeitando restrições específicas” (KALAY, 1985, p.320). No caso da arquitetura, segundo Vries e Wagter (1989), o processo de projeto apresenta algumas especificidades em relação à outras disciplinas. Em primeiro lugar, não há uma sequência de ações claramente definida que leve ao resultado esperado, as soluções são criadas e testadas a fim de verificar sua adequação. Em segundo lugar o processo de projeto arquitetônico não tem um final definido, este é, em geral, estabelecido em função de prazos ou de custos, raramente pela incapacidade de melhoria do resultado. Isso ocorre devido ao fato deste processo ser uma sequência continua de melhorias que afetam e são afetadas por todas as demais soluções de projeto, além disso, não há, como meta, um objeto real específico, mas uma ideia básica de resposta a um problema que serve como direcionamento para o projetista. Por fim, em terceiro lugar, assim como não há um fim específico, também não existe um ponto de partida fixo, as informações iniciais, como *briefing* ou mesmo o próprio terreno, podem ser modificados e ajustados com o decorrer do projeto (VRIES E WAGTER, 1989).

Sendo assim, como apresentado por Kalay, (1985 e 2006), projetar é a busca, com base em meios analíticos, racionais, ou aleatórios, pela solução mais adequada em um universo de soluções possíveis. Com isso, o processo de projeto se caracteriza como uma sequência de ações para analisar estados iniciais e elaborar planos de ação em busca de novos estados considerados mais adequados (KALAY, 1985 e 2006).

Figura 01 – Projeto como uma busca direcionada ao objetivo



Fonte: KALAY, 1985 (tradução livre)

Apesar de existirem diversas abordagens quanto ao processo de projeto, diversos autores parecem concordar quanto à concentração das atividades de projeto em fases relativamente bem definidas. Na (1) fase de análise, acontece o ordenamento e a estruturação do problema, é quando se assimilam as condicionantes, se acumulam e organizam informações com o objetivo de definir metas e objetivos, critérios de desempenho, restrições e possíveis impactos para os usuários. A (2) fase de síntese, é quando passam a ser investigadas possíveis soluções para o problema, como resposta às restrições e oportunidades que se apresentaram na fase de síntese, é a fase de concepção criativa. Uma terceira fase é a (3) avaliação, nela acontece o desenvolvimento e refinamento de uma ou mais soluções possíveis, através de simulação, previsão lógica, protótipos etc., procura-se verificar a adequação das respostas geradas ao problema levantado anteriormente (ANDRADE et al., 2011; LAWSON, 2011; RIBA apud LAWSON 2011).

Lawson (2011) explora a relação entre as fases apresentadas e estabelece uma série de discussões sobre o processo de projeto apontando que o caminho que leva do problema à solução é, na realidade, a interação contínua entre estes dois elementos mediados por atividades de análise, síntese e avaliação, sem uma ordem específica ou definida sequencialmente.

Os sistemas BIM estão diretamente ligados aos meios de representação, sendo assim, vale citar uma fase do processo de projeto formalizada por alguns autores, que seria a comunicação/representação de uma ou mais soluções tanto para participantes do processo quanto para membros externos a ele (ANDRADE et al., 2011; RIBA apud LAWSON 2011).

Como se vê, pode-se dizer, que duas das características principais do processo de projeto são sua indeterminação e variabilidade, o que pode indicar a inviabilização da automação do processo como um todo, no entanto, sua aplicação para algumas restrições e atividades rotineiras pode ser explorada como suporte à tomada de decisão por parte dos projetistas.

3.2.2 Evolução do CAD

Na década de 1980, Kalay (1985) destacava, ao analisar o impacto do computador no processo de projeto, que havia uma expectativa de que a automação de processos de concepção e fabricação levassem a melhorias significativas na produtividade e na qualidade dos produtos, algo que, até então, não havia se concretizado. Segundo a autora, naquele momento, a maioria dos sistemas baseados no computador eram apenas ferramentas de elaboração/modelagem,

papel distante do que seria sua aplicação ideal, como assistentes inteligentes de projeto baseados no conhecimento.

Segundo Andrade e Ruschel (2011:421-422), nos últimos trinta anos, o tema *Building Information Modeling* (BIM), tem sido explorado regularmente, buscando estabelecer seu papel ao longo do processo de projeto, construção e operação do edifício. Dos estudos realizados neste período, uma série de termos foi utilizada para descrever o universo BIM, em geral, associados a uma ferramenta (instrumentação dos profissionais através de aplicativos computacionais), uma tecnologia (desenvolvimento e uso da informação do projeto do edifício – documentação, simulações e operação) ou um processo (gerenciamento das informações do edifício – projeto, construção e operação) (ANDRADE E RUSCHEL, 2011:421-422).

Como visto, o BIM pode ser caracterizado como a terceira fase da adoção do computador como ferramenta de projeto. O que se iniciou com uma substituição dos instrumentos de desenho, ainda sem qualquer interferência direta na forma de se projetar, chegou a visualização 3d, algo que possibilitou uma série de experimentações e simulações realizadas diretamente em um protótipo da edificação. Chegamos, então, ao momento em que o computador passa a integrar de forma direta o processo de projeto (HOWELL E BATCHELER, 2005).

Ayres Filho (2009) afirma que a modelagem do produto ganha força a partir do momento em que o cenário econômico mundial globalizado passou a exigir melhores prazos, qualidade e custos e com isso se fez necessária a abordagem integrada de diferentes aspectos do produto desde sua concepção à própria construção. “A modelagem baseia-se na integração dos sistemas envolvidos no desenvolvimento do produto e na utilização da tecnologia de informação como suporte para esses processos” (AYRES FILHO, 2009).

Segundo EASTMAN, C. (1975), por muito tempo, a única alternativa aos desenhos eram os modelos físicos e ainda assim, em sua maior parte estes eram e ainda são usados como material promocional e não como parte do processo. Neste artigo, de 1975, seminal no que diz respeito à modelagem por computador, o autor descreve uma série de ações que posteriormente se configurariam como o BIM, do modelo tridimensional como fonte de desenhos até mesmo às possibilidades de simulações e os relatórios de custo.

Com estes ensaios iniciais, o conceito de modelagem computacional de edifícios surge junto aos primeiros softwares de projeto, no entanto, devido às limitações de custo, processamento e mesmo à ampla adoção do CAD, esta forma de projetar se manteve em segundo plano até o início da década de 1990, quando o BIM passa a ser tema de pesquisas a ferramenta comercial viável (EASTMAN, C. et al, 2008:353).

Em meio ao processo de adoção do BIM, há uma mudança de foco no sistema CAD, podendo-se apontá-lo como a transição entre o pensamento analógico e o digital. Neste contexto, o projeto passa a ser gerenciado através de um modelo tridimensional capaz de abarcar todo o processo de projeto e obra em um único suporte. O BIM é a junção entre processo e ferramenta de projeto tendo como benefício a geração de desenhos como um subproduto e não como meio de desenvolvimento. A partir disso, o foco do projetista passa a ser nas soluções de projeto e não mais em desenhos técnicos (BIRX, 2006).

Para EASTMAN, C. et al (2008), a transição entre CAD e BIM não é uma progressão natural, a mudança de paradigma do desenho bidimensional para o modelo tridimensional envolve raciocínios diferentes que levam à modificações no próprio ato de projetar. O processo como um todo passa a se pautar em práticas colaborativas, tanto na etapa de projeto quanto na construção.

3.2.3. BIM

O foco principal dos projetos na construção civil tem cada vez mais se ampliado das soluções de caráter estético incorporando as questões desempenho. Com isso, cresce a adoção de novas tecnologias, muitas vezes vindas da lógica de desenvolvimento de produtos do design industrial e das engenharias. O BIM, através de ferramentas como sistemas generativos, e algoritmos paramétricos, pode proporcionar alternativas nas fases iniciais de projeto e/ou facilitar o gerenciamento do projeto, construção e posterior operação do edifício (ABRISHAMI et al. 2013).

De acordo com Kensek e Noble (2014), BIM é considerado um banco de dados composto pelo modelo 3D, a parametrização e a interoperabilidade entre agentes. Ele pode ser definido como uma representação digital das características físicas e funcionais de uma edificação. Sua premissa básica é a colaboração entre diferentes agentes através de uma fonte de informações compartilhada criando uma base confiável para as decisões ao longo do ciclo de vida de uma edificação. Busca-se que cada agente do processo interfira diretamente no objeto através da inserção, extração, atualização ou modificação de informações em um suporte BIM, tais ações se configuram, ao mesmo tempo, como apoio e reflexo do papel de cada agente no processo (NIBS 2016).

Visto que o BIM se baseia em um modelo tridimensional do edifício, sua funcionalidade está diretamente ligada à representação precisa do projeto. No entanto, Picon (2006, p208), destaca que “não existe projeto arquitetônico sem alguma margem de indeterminação que nos

permita seguir diferentes caminhos”, talvez por isso, aliado à questões legais de responsabilidade pelo material produzido, ainda haja, como apontado por Steel et al (2010, p.100) uma preferência das empresas pelos desenhos impressos, pois pode haver uma indefinição entre o que é determinado e o que é ilustrativo. Os mesmos autores destacam que apesar desta preocupação, o uso do BIM tem crescido consideravelmente visto que o modelo tridimensional é amplamente utilizado por arquitetos e tem tido uma boa aceitação e crescimento entre engenheiros e outros complementares, incluindo planejamento de quantitativos e custos, análise ambiental entre outros.

Em geral, o BIM é tratado como uma forma holística de abordar o edifício, desde sua concepção até sua operação. Baseado nas possibilidades das ferramentas CAD hoje disponíveis, nas possibilidades de visualização, ensaios, simulações, cálculos de custo, agendamento de ações de projeto e construção, manutenção e até mesmo procedimentos de demolição busca-se a participação constante de toda a cadeia de complementares como forma de tornar o processo mais eficiente e eficaz. Levando em conta esta múltipla participação, o BIM procura transformar o modelo tridimensional no centro do processo de projeto, no objeto que concentra todas as ações colaborativas dos agentes envolvidos.

Eastman, C. et al (2008) explicam que os sistemas CAD geram arquivos digitais e, que à medida em que tais sistemas “ficaram mais inteligentes, e mais usuários desejavam compartilhar dados associados a determinado design, o foco passou, dos desenhos e das imagens tridimensionais para os dados propriamente ditos” (EASTMAN, C. et al, 2008, p.15). Tal característica é o que possibilita a colaboração exigida pelo BIM, no entanto, passa a existir a necessidade de comunicação entre os diversos sistemas utilizados pelos diversos agentes do processo, ou seja, a interoperabilidade.

A *buildingSMART*, organização internacional que surge com o objetivo de apoiar as empresas de arquitetura, engenharia e construção, em direção ao projeto integrado, desde o projeto propriamente dito até o gerenciamento da instalação, passando pela sua construção, sugere o *Industry Foundation Classes* (IFC), um esquema de dados que torna possível o porte e a troca de dados relevantes entre diferentes softwares (*BuildingSMART*, 2016).

A interoperabilidade baseada no IFC se dá em quatro níveis: (1) nível arquivo – capacidade de duas ferramentas trocarem arquivos; (2) nível sintaxe – capacidade de duas ferramentas analisarem tais arquivos sem erros; (3) nível visualização – capacidade de duas ferramentas visualizarem um modelo de forma confiável; (4) nível semântico – capacidade de duas ferramentas chegarem a um entendimento comum do significado do modelo em troca (STEEL et al 2010:100).

Em uma análise destes quatro níveis, Steel et al (2010) afirma que em relação a (1) arquivo e (2) sintaxe, existem problemas quanto ao tamanho dos arquivos transferidos, restrições de consumo de memória ou número de objetos em um modelo, gerando falha de carregamento, renderização ou geração de documentação 2D. No que diz respeito ao (3) nível visualização, que, a princípio, é o principal objetivo do IFC, este tem se mostrado com maior sucesso, pois os modelos geralmente não enfrentam problemas na transição entre softwares em si, os problemas neste nível se apresentam devido às diferentes formas de encarar o modelo tridimensional, enquanto o arquiteto escolhe cores e texturas em função de sua real aparência, complementares em geral aplicam cores de forma esquemática, mais preocupados com a distinção entre objetos do que com sua fiel representação estética.

Ao abordarem o (4) nível semântico, Steel et al (2010) destacam que este ganha cada vez mais importância à medida em que a indústria se aprofunda na aplicação do BIM. Os problemas neste nível são os mais significativos, indo desde simples questões técnicas, ou da cobertura dos softwares em relação ao universo de objetos existentes, até problemas ligados aos estilos de modelagem utilizados pela comunidade envolvida na troca de dados.

Como se vê, o BIM vai além da simples possibilidade de geração automática de documentação para construção. McKinney e Fischer (1998) destacaram o que se conhece como BIM 4D, a abordagem associada do tempo (programação) e do espaço (modelo do edifício), com isso se abordam fases de projeto ou mesmo cronogramas de construção. O modelo 5D, como apontado por Lu et al. (2015), aproveita a riqueza de informações dos suportes BIM, como materiais utilizados e, além de prazos, aborda custos e programações.

Yung e Wang (2014:1) conceituam o BIM 6D como o modelo que concentra o objeto 3D, tempo, custos e passa a abordar a sustentabilidade. Tal modelo pode gerar automaticamente dados sobre impactos econômicos, ambientais e sociais, possibilitando a avaliação da performance de cada alternativa de projeto adotada, abordando todo o ciclo de vida do edifício, produção dos materiais, construção, operação, manutenção, demolição e eliminação. Há ainda a possibilidade do gerenciamento de instalações a partir deste modelo holístico do edifício, como apontado por Kang e Choi (2015) Tais possibilidades, como destaca Florio (2007), podem contribuir de forma significativa para gerenciamento e simulação de etapas de construção, aumento da precisão, redução de desperdícios, controle de atividades críticas da execução, além das diversas possibilidades de simulações, desde esforços estruturais à movimentação do ar, passando pela acústica e distribuição do som.

O projeto arquitetônico é um processo intrinsecamente ligado à informação, seja pelo fato de produzi-la continuamente ou pelo fato de coletar, processar e reorganizar informações

oriundas de diferentes fontes. Sendo assim, uma revolução tecnológica que impacte o processamento de informações, tem o potencial de afetar os principais processos e produtos da arquitetura. Hoje, pode-se verificar a transformação de um modelo rigorosamente hierárquico em uma rede de concepção, fabricação, marketing e gestão, na qual, a responsabilidade pelas operações de design é distribuída por múltiplas profissões, organizações e localizações geográficas (KALAY, 2006).

Kalay (2004) apud Andrade et al. (2011) ressalta a forma como as novas ferramentas, como “novas técnicas de desenho e a realização de maquetes possibilitaram aos arquitetos experimentar novas soluções de projeto”. Esta resposta ao ambiente tecnológico em que o arquiteto está inserido, pode ser vista ao longo de toda a história e, seguindo este mesmo conceito, pode-se notar a adoção, cada vez mais integrada, dos conceitos de BIM.

Por fim, Eastman, C. et al (2008, p.17) afirma que “o BIM move a indústria para frente, da automação das tarefas de projeto atuais e dos processos ‘papel-cêntricos’ em direção à um fluxo de trabalho integrado e baseado na interoperabilidade”. Assim, o processo de projeto procura se aproveitar da colaboração de agentes, das capacidades computacionais, da comunicação web e da captação de conhecimento, entre outros, para simular e manipular modelos capazes de contribuir para a tomada de decisões ao longo do processo de projeto, construção e uso da edificação, reduzindo riscos e enriquecendo as ações e produtos da indústria como um todo.

3.2.4. Parametrização

Lawson (2011) abre uma discussão sobre o processo de projeto a partir da qual se pode concluir que o caminho entre o problema e sua solução é, na realidade, a interação contínua entre estes dois extremos mediados por atividades de análise, síntese e avaliação, sem que ocorra uma ordem específica ou definida linearmente. Complementando a análise, Andrade e Ruschel (2011, p.425), afirmam que “em diversos momentos de síntese, são realizados vários testes na geometria do modelo” em busca da solução mais adequada para o problema. Neste contexto, se apresenta o modelo paramétrico que, para Hernandez (2006, p.310), “é o processo de projetar em um ambiente em que as variações de possibilidades não requerem esforços, substituindo singularidade por multiplicidade no processo de projeto.”⁶

⁶ Livre tradução de: “Parametric Design is the process of designing in environment where design variations are effortless, thus replacing singularity with multiplicity in the design process.”

Objetos paramétricos foram originalmente desenvolvidos nos anos 1980 e são o que diferencia os modelos tridimensionais comuns dos modelos BIM. Tais objetos podem ser entendidos como relacionados ao pensamento abstrato, pois não apresentam geometrias ou propriedades fixas. Eles se baseiam em dados, regras e relações mútuas que permitem a automatização de modificações e ajustes. A integração dos elementos do modelo em diversos níveis de agregação, evita a redundância de informações e elimina inconsistências, podendo inclusive, detectar possíveis violações à viabilidade técnica ou exequibilidade dos objetos, algo que não seria possível ou simplesmente impraticável (EASTMAN et al 2008;18 e 31).

Hernandez (2006), classifica os modelos paramétricos em: (1) para variações, (2) para combinações e (3) híbridos. Modelos “para variações paramétricas” com um objeto pré-definido e compostos por um conjunto de elementos, apresentam a possibilidade de variação de parâmetros de suas partes, tais variações, em geral, são relacionadas a tamanho, diâmetro, escala e proporções. Os modelos “para combinações paramétricas” são formados por conjuntos de figuras geométricas com possibilidade de variação nos arranjos entre elas e delas com outras, através de regras de combinação que podem gerar diversas composições. “Modelos paramétricos híbridos”, por sua vez, se utilizam das duas classificações anteriores em conjunto. Apesar de oferecer o melhor de cada uma delas, possibilitando diferentes explorações formais. Ele é menos comum do que os anteriores, supostamente por ser mais complexo em termos de construção e estrutura de dados. Contudo, às vezes é mais indicado trabalhar com modelos específicos “para variações” e “combinações” em paralelo do que construir um modelo híbrido.

Eastman et al (2008) discutem graus de modelagem paramétrica. Segundo os autores, a mais simples é a atualização realizada pelo usuário individualmente de formas ou arranjos – modelagem sólida paramétrica. Na sequência está a atualização automática, isto é, uma sequência pré-definida de um conjunto de formas em função das modificações realizadas – montagem paramétrica. Por fim, o próprio sistema seria capaz de definir a sequência de atualização – modelagem paramétrica de objetos. Neste ponto, os autores ainda abordam as especificidades dos sistemas paramétricos BIM em comparação ao que se apresenta em outras indústrias, como a aeronáutica ou automobilística, destacando seu número relativamente pequeno, e apontam como causas, entre outros fatores, a complexidade dos modelos de construção no que diz respeito ao volume de dados necessários e a complexidade dos desenhos a serem produzidos. Sendo assim, várias tecnologias diferentes precisam ser combinadas em um sistema de modelagem paramétrica adaptado à indústria da construção.

Ao discutir as características dos sistemas BIM paramétricos, Eastman et al (2008) apresentam cinco tópicos a serem explorados: (1) estrutura relacional ou topológica, (2)

manipulação de atributos ou propriedades, (3) geração de desenhos, (4) escalabilidade e (5) gerenciamento de objetos e ligações.

Uma das características fundamentais da modelagem paramétrica é a (1) relação entre as partes que compõem o modelo, tal relação é estabelecida em função de conexões – topologia. Nestas conexões se concentram informações do que pode ser conectado, as partes de um conjunto, como a conexão se comporta em resposta a vários contextos e as propriedades da relação estabelecida. O BIM, além da geometria e topologia, proporciona um ambiente capaz de gerenciar e integrar as (2) propriedades e atributos da edificação ao longo do ciclo de vida do projeto, permitindo que os dados sejam interpretados, analisados, precisificados e usados por outros aplicativos. A cultura da indústria da construção, mesmo que em processo de mudança para um modelo sem papel, ainda se baseia em desenhos. Com isso, as ferramentas paramétricas precisam estar adequadas a esta realidade, para (3) gerar a documentação demandada de forma confiável, dessa maneira, se adequando a todas as especificidades e complexidades da representação arquitetônica, uma das vantagens do modelo é o fato de todos os desenhos serem gerados a partir de um “modelo comum”, reduzindo redundâncias e erros (EASTMAN et al. 2008:57-67).

O problema da (4) escalabilidade se apresenta quando os modelos ficam grandes demais para seu uso prático, tal característica se apresenta, tanto em função do tamanho do modelo, quanto em função de seu nível de detalhamento. Em um modelo, cada elemento apresenta regras internas e de relacionamento com o todo. Tratar esta hierarquia de regras amplia a complexidade do modelo em termos de uso dos recursos de processamento e, mais especificamente a demanda por memória. Por fim, em função do volume de informações e a constante troca de dados, o objetivo do (5) gerenciamento de objetos deve ser a identificação dos objetos e de suas modificações. Assim, problemas quanto ao tamanho dos arquivos, por exemplo, podem ser reduzidos a partir da transferência de dados referentes apenas às modificações realizadas. Outra possibilidade de agilização da transferência de dados, são os arquivos com dados externos, sendo que, planilhas podem concentrar dados referentes a partes do modelo e assim, transferi-los de forma mais fácil (EASTMAN et al. 2008:57-67)

Schumacher (2008) trata a parametrização como a resposta arquitetônica ao mundo atual, no Manifesto Parametricista, o autor afirma que a arquitetura vive em meio a um ciclo contínuo de adaptação inovadora. Para ele, deve-se perseguir o design paramétrico até o fim, a variação sistemática e adaptativa, a diferenciação contínua (não a mera variedade), e a dinâmica dizem respeito a todas as tarefas de projeto, do urbano ao detalhe arquitetônico. Desta forma seria

possível desenvolver um repertório arquitetônico e urbano preparado para a criação de campos complexos, policêntricos em múltiplas camadas e continuamente diferenciados.

3.2.5. Sistemas Generativos

“Um sistema generativo é um método indireto do projeto, no qual o projetista não se preocupa apenas com a solução de um problema em particular em um contexto específico. Ele (ou ela) procura criar um projeto mais ou menos genérico, que possibilite resolver problemas semelhantes em contextos diferentes.” (CELANI, 2011)

Sistemas generativos de projeto são um conjunto de definições abstratas de variações capazes de exibir ou produzir projetos, sem necessariamente se restringir à aplicação de ferramentas digitais (FISCHER e HERR, 2001), um exemplo de sistema analógico que pode ser classificado como generativos é a gramática da forma (FISCHER e HERR, 2001; SHEA et al., 2005). No entanto, em termos gerais, tais sistemas “visam a criação de um novo processo de projeto capaz de produzir novas possibilidades espaciais, eficientes e edificáveis, através da exploração dos recursos de computação e fabricação atuais” (SHEA et al. 2005). Em suma, tal conceito se refere a qualquer prática de projeto, na qual o projetista usa um sistema com algum nível de autonomia, para produzir a solução para o problema de projeto (ABRISHAMI et al. 2013).

Krish (2010), classifica os problemas de projeto em dois: rotineiros e criativos. Para ele, os avanços na automação tem gradualmente substituído as atividades de rotina. No entanto, o autor afirma que os processos criativos apresentam uma complexidade e subjetividade que tornam sua automatização uma tarefa praticamente impossível. Sabido que tais problemas, além de amplos, apresentam natureza contraditória e não quantificável. Questões estéticas, por exemplo, refletem intenções e elaborações pessoais baseadas na visão de mundo do projetista e, por isso, ainda se encontram além do alcance dos processos computacionais. Sendo assim, a automatização de processos se apresenta frequentemente nas fases finais do processo de projeto, buscando a otimização de decisões já tomadas anteriormente. Por outro lado, os sistemas generativos, podem ser um suporte ainda nos estágios conceituais, visto que “explorar variações de projeto nas fases iniciais pode produzir resultados muito mais benéficos do que otimizá-los nas fases finais de projeto” (KRISH, 2010, p.89). Shea et al. (2005), destacam que além disso,

alguns sistemas generativos implementados, em geral, incorporam o feedback do desempenho físico dos edifícios.

Para Abrishami et al. (2013) as limitações apresentadas pelo BIM na fase conceitual do projeto podem ser contornadas com os sistemas generativos atuais. Shea et al. (2005), exploram a modelagem paramétrica como a transformação do computador, de assistente de modelagem, em agente do processo de projeto, construindo a forma através do uso de dados de projeto, restrições geométricas e relações dimensionais. Neste caso, a atuação do projetista está presente tanto na manipulação das expressões paramétricas, ou seja, das regras que geram o modelo – manipulação estratégica –, quanto na manipulação gráfica de relações de dependência através da geometria associativa – manipulação intuitiva.

Para conseguir a desenvoltura na manipulação do objeto, além da compreensão da lógica de concepção do projeto, se faz necessário o conhecimento técnico de programação e funcionamento das ferramentas utilizadas. Mitchell (2008, p.14) explora a primeira questão procurando demonstrar “como as linguagens arquitetônicas podem ser estabelecidas, interpretadas e utilizadas”, o autor apresenta um método de descrição de edifícios de forma lógica que se utiliza variáveis, armazenamento de valores em estruturas de dados, qualificadores, relações físicas e expressões, entre outros. Este método poderia ser compreendido como uma sequência de operações lógicas, e como tal, replicáveis em sistemas CAD.

No que diz respeito à programação, Chase (2005), afirma que o ensino de computação nos currículos de arquitetura se voltou para a aplicação das ferramentas de modelagem e visualização em detrimento da instrução voltada para sua programação, ficando esta, nas mãos de programadores profissionais. Com isso, esta pode ser caracterizada como a principal limitação para a adoção dos sistemas generativos baseados em algoritmos.

Teoricamente, pode-se observar que a parametrização e sistemas generativos são vistos, não necessariamente como uma forma de automatização total, mas como uma ferramenta de suporte ao processo de projeto, conservando a interatividade com o modelo e o direcionamento totalmente controlado pelo projetista. Tarefas qualitativas e quantitativas, processos rotineiros e criativos, podem ser tratados de forma diferente. A compreensão das especificidades de cada uma destas pode contribuir para que a adoção das novas ferramentas de projeto consigam se aproveitar da sinergia do ser humano e do computador. Assim, a modelagem paramétrica poderia estender as capacidades dos projetistas provocando novas ideias e resolvendo tarefas difíceis.

3.2.6. Algoritmos Genéticos (GA)

Chardon et al. (2016) afirmam que a otimização no projetos de construção tem sido estudada há décadas e que os algoritmos genéticos mostram bons resultados no trato destes problemas. Tais algoritmos são baseados no princípio da evolução de Darwin.

“A população de indivíduos submetidos a um ambiente hostil evolui através de gerações sob a lei da seleção natural. A ideia geral é que os indivíduos mais adaptados têm mais chance de sobreviver e se reproduzir, e, portanto, para transmitir seus genes para a próxima geração. Depois de várias gerações, a população é mais adaptada que a inicial.”⁷ (CHARDON et al. 2016)

Para Mitchell (1999), algoritmos genéticos (GA) são uma forma de computação evolutiva, mas que não tem uma definição única aceita de forma incondicional. A autora destaca, no entanto, que os métodos GA apresentam alguns elementos comuns, (1) as populações de cromossomos, (2) seleção de função do grau de adaptação, (3) cruzamento para produzir novos descendentes e, (4) mutação aleatória dos descendentes. Apesar da terminologia semelhante à utilizada em biologia, no caso dos algoritmos ela está totalmente voltada para a linguagem de computação, os cromossomos se apresentam como cadeias de bits e cada um apresenta os alelos possíveis 0 e 1.

Com estas analogias estabelecidas, algoritmos genéticos são na realidade, ferramentas de otimização baseados na ideia de uma sequência evolutiva de soluções. As primeira respostas ao problema são geradas aleatoriamente e podem evoluir para uma ou mais soluções otimizadas. Tal tipo de abordagem se mostra apropriada para solucionar problemas com objetivos múltiplos, como é o caso dos problemas relacionados à construção ou ao projeto (FAGHIHI et al. 2015). De forma geral, o processo de evolução é dirigido pelos princípios de seleção, a partir da reprodução e mutação de uma população de indivíduos. No caso dos algoritmos genéticos a seleção se baseia em valores de referência para a adaptação da solução obtida e a reprodução consiste em gerar uma nova população a partir de resultados selecionados. Sendo assim, após

⁷ Livre tradução de: “A population of individuals submitted to a hostile environment evolves through generations under the natural selection law. The general idea is that the fittest individuals have more chance to survive and reproduce, and hence to transmit their genes to the next generation. After several generations, the population is fitter than the initial one.”

um determinado número de gerações de respostas ao problema, a nova população passa a apresentar indivíduos mais adaptados que a inicial (CHARDON et al. 2016).

3.2.7. Aplicações práticas do BIM, parametrização e SG no processo de projeto

Benévolo (1991), defende que os instrumentos de abordagem do problema Cidade influenciaram no espaço produzido ao longo da história. Como exemplo, o autor cita a forma como a cultura artística do renascimento levou ao abandono da regularidade geométrica em busca da visão instantânea da perspectiva, que gerou os grandes eixos visuais projetados nas cidades a partir de então. Neste contexto, uma mudança na forma de abordar o tema cidade, poderia, supostamente, produzir espaços mais adaptados à sociedade contemporânea.

Em geral, as evoluções tecnológicas são incrementais, fruto de refinamentos de tecnologias existentes, no entanto, em alguns momentos ocorrem mudanças com força revolucionária, as quais, têm sido, quase sempre, ligadas à evolução social de quem as criou (KALAY, 2006:366).

A entrada do computador na indústria da construção trouxe uma série de possibilidades principalmente ligadas à troca de informações entre as equipes de projeto e de construção, com isso, passam a ser possíveis estruturas mais complexas que não poderiam ser construídas anteriormente. Até mesmo sistemas de operação de edifícios obtiveram benefícios à medida em que passaram a ser adotados mecanismos de controle, como os térmicos ou lumínicos, ou mesmo a possibilidade de estruturas dinâmicas que podem ser mais leves, altas e econômicas do que as estáticas. Sendo assim, mesmo com o distanciamento temporal entre projeto e construção, as duas etapas se beneficiam com a adoção do computador como ferramenta, visto que eles são processo que, mutuamente, se retroalimentam com informações (KALAY, 2006:366).

No caso da arquitetura, a adoção do BIM, da parametrização e dos sistemas generativos, é colocada como uma de mudança de paradigmas no projeto baseada na lógica do pensamento digital. Segundo Andrade e Ruschel (2011), este cenário aponta para a redistribuição das atividades dos projetistas com mais ênfase na concepção. Baseado em coordenação, interoperabilidade, compartilhamento e reuso de informações modificam o processo de projeto e implicam em uma mudança também na “estrutura da ação projetual, com redefinição das estratégias de investigação, das técnicas e dos procedimentos de avaliação” (ANDRADE E RUSCHEL, 2011:422-423).

Souza et al. (2009) realizaram um diagnóstico da adoção do BIM em escritórios de arquitetura no Rio de Janeiro, São Paulo e Curitiba. Segundo eles, pelo estudo constatou-se que havia uma compreensão do BIM como uma ferramenta capaz de melhorar a qualidade do projeto, facilitar as modificações, melhorar as apresentações e diminuir o prazo de entrega e a carga horária dedicada para cada projeto. Foram destacadas como dificuldades, a falta de tempo para implantação, a escassez de profissionais com domínio dos softwares, a incompatibilidade com parceiros de projeto, a necessidade de investimento e a necessidade de mudança na forma de pensar o processo de projeto devido às características do BIM. Ainda segundo os autores, poucos clientes percebiam a vantagem da adoção do BIM, que se mostrava uma decisão individual dos próprios escritórios visando a melhoria de seus processos. Gu e London (2010), chegam a um resultado semelhante, e destacam ainda que há um forte interesse pela adoção do BIM, porém, ainda se verifica a falta de conhecimento prático para aplicar a tecnologia e de uma ideia clara de como ela se adequaria às necessidades individuais.

Em uma análise das possíveis aplicações de tais conceitos nas fases de projeto apresentadas por Lawson (2011), pode-se, dizer, que na fase de análise, está o início do uso das ferramentas de parametrização ao se sistematizar as condicionantes, sejam elas ambientais ou legais. A fase de síntese, por sua vez, continua sendo definida como um processo criativo, no entanto a geração de respostas ao problema pode ser beneficiada com a agilização dos processos de cálculo e adequação às exigências legais. Por fim, a fase de avaliação recebe uma série de benefícios à medida em que a comparação entre as soluções apresentadas pode ser quantificada de acordo com quaisquer parâmetros previamente definidos.

Como outra possibilidade desta tecnologia, Rodrigues (2015) discute a mudança da verificação manual para a automática de projetos como forma de agilização do licenciamento nos municípios, destacando como vantagem, a redução dos prazos e a possibilidade de maior rigor na análise. Para os projetistas, visto que parte do trabalho seria realizado de forma automática, a vantagem seria a possibilidade de manter o foco em questões importantes como segurança, sustentabilidade e performance ambiental.

Ainda que a verificação automática se mostre interessante, em um estudo quanto às normas portuguesas de acessibilidade, Rodrigues (2015:60) afirma que alguns aspectos da legislação impedem este tipo de ação para todas as exigências legais conjuntamente. A redação das regras em alguns momentos é feita de uma forma que impede a verificação automática. As próprias normas e regulamentações, por vezes, não podem ser equiparadas pois são escritas e organizadas de formas distintas e parte dos requisitos não possibilitam uma verificação direta. Outra questão a ser considerada é o fato de fases diferentes do processo de licenciamento

exigirem modelos distintos com informações específicas. Ainda assim, destaca-se que o autor conclui que a verificação automática pode ser uma realidade. A adoção de mecanismos para ajustes nos itens levantados acima pode facilitar o processo.

Em geral, o senso comum é de que o processo de aprovação nas autoridades municipais se dá através de desenhos bidimensionais impressos. A avaliação da adequação dos projetos às normas vigentes se apoia na análise de elevações, cotas de nível, medidas, cortes, relação entre os desenhos e cálculo de áreas. Scheer e Romero (2009) desenvolveram um estudo comparativo da utilização dos meios tradicionais e das ferramentas BIM, para cada um dos itens acima, na aprovação de projetos na cidade de Curitiba. Em suma, os autores afirmam que o método tradicional apresenta limitações intrínsecas do papel como suporte adotado, os desenhos formalizados em pranchas muitas vezes não fornecem informações suficientes ou mesmo, podem conter erros de representação ou de coerência dos desenhos. Ferramentas BIM, no entanto, se baseiam em um modelo 3D a partir do qual, o analista tem liberdade para visualizar o projeto em todo seu contexto, permitindo maior precisão e agilidade no processo. Por fim, até mesmo o processo de correção pode ser agilizado, visto que na modelagem BIM, devido à parametrização, os elementos construtivos são interconectados e integrados, facilitando as revisões e contribuindo para o aumento da produtividade.

A aplicação do conceito de BIM com modelos tridimensionais de cidade, tem alterado significativamente a forma como gerenciamos informações sobre o espaço urbano, no entanto, tais modelos ainda se concentram em informações físicas e funcionais, deixando de lado os aspectos legais. Hoje, existem alguns sistemas especializados em armazenar dados cadastrais de terrenos e outros aspectos legais, assim, uma próxima etapa na busca de uma maior usabilidade dos modelos de cidade é a integração destes dois sistemas (AIEN et al. 2015).

Issa et al. (2009), afirma que um campo promissor da tecnologia BIM é a simulação, visto que, sob outro aspecto, ela permite maior exploração e refinamento do projeto da construção e, mesmo, da operação das edificações. A busca crescente pela sustentabilidade, aumenta a demanda por simulações para determinar o impacto ambiental das decisões de projeto, além disso, tanto nas edificações convencionais, quanto naquelas desenvolvidas com as ferramentas de parametrização e sistemas generativos, há um aumento da complexidade dos objetos arquitetônicos. Com isso, a modelagem passa a ser fonte de estudos com o objetivo de otimizar a escolha dos meios e métodos de construção (ISSA et al. 2009).

A partir do exposto acima, pode-se concluir que a crescente inserção do computador no campo da arquitetura alcançou um ponto chave em que se proporciona uma mudança de paradigmas no pensamento de projeto. Se anteriormente as ferramentas digitais tinham um

caráter passivo e apenas replicavam de forma, supostamente, mais eficaz as ferramentas analógicas, hoje, cada vez mais o computador passa a exercer um papel ativo no processo de projeto. Sendo assim, enquanto a automatização total do campo parece distante, a simbiose homem/tecnologia digital pode trazer benefícios no que diz respeito à agilização de processos, automação de cálculos e à redução de tarefas repetitivas.

4. ANÁLISE DA LEGISLAÇÃO DA CIDADE DE JUIZ DE FORA

Nos mais de 120 anos de legislação urbana em Juiz de Fora, desde as exigências mais voltadas para aspectos sanitários até a Legislação Urbana Básica da cidade, de 1986, as limitações se davam em grande parte pelas características tecnológicas da cidade na época (CARDOSO, 2015). A partir de então, passaram a ser adotados parâmetros mais específicos de regulamentação com o objetivo de controlar a ocupação do espaço urbano (ANEXO 01). Esta legislação continua vigente atualmente, porém, com as modificações realizadas em 2013 que se referem à ampliação da altura máxima permitida, aos ajustes referentes no embasamento, ao dimensionamento de garagens e ao cálculo de ventilação e iluminação, além de possibilidades diferentes de coeficiente de aproveitamento para um mesmo modelo de ocupação em função do número de vagas para automóveis disponíveis para cada unidade (PREFEITURA DE JUIZ DE FORA 2013A; 2013B).

As tabelas apresentadas no Apêndice 01 resumem a análise das exigências legais da cidade de Juiz de Fora, abordando suas possibilidades de parametrização e apresentando aquelas utilizadas neste estudo bem como uma justificativa para cada um dos casos. Vale ressaltar que pelas características exploratórias do estudo, parte dos parâmetros da legislação não se mostraram adequados à aplicação pois apresentam/requeriam uma complexidade incompatível com o período de tempo disponível para o estudo.

A partir das definições apresentadas no Apêndice 01, em uma primeira etapa, os itens indicados para parametrização foram explorados de forma mais aprofundada, buscando compreender como a legislação interfere diretamente nos volumes a serem construídos na cidade. O Quadro 07 apresenta a classificação dos parâmetros utilizados no código de obras de acordo com seu impacto na forma arquitetônica, procurou-se classificá-los em geradores de forma – aqueles que definem a área a ser construída –, limitadores da forma – limites o espaço máximo para a forma a ser gerada –, restrições – demais limitadores que interferem no volume

virtual máximo do edifício – e extras – permissões legais além da área construída máxima. Com isso, se buscou tornar claras as interferências de cada um dos itens na forma a ser gerada.

Quadro 07 – classificação dos parâmetros utilizados pela legislação urbana

Geração de forma	Limitações	Restrições	Extra
<ul style="list-style-type: none"> • Área do terreno • Coeficiente de aproveitamento 	<ul style="list-style-type: none"> • Gabarito • Taxa de ocupação • Área permeável • Recuo • Afastamentos • Embasamento 	<ul style="list-style-type: none"> • Medidas mínimas dos ambientes <ul style="list-style-type: none"> • Áreas dos ambientes • Diâmetro mínimo dos ambientes • Diâmetros de ventilação • Alcance da ventilação • Equipamentos de segurança <ul style="list-style-type: none"> • Rotas de fuga • Circulação mínima 	<ul style="list-style-type: none"> • Armários na fachada • Varandas até 15% • Cobertura até 60%
•	• Número de vagas	•	•

Fonte: Autor

Em uma segunda etapa, foram identificados os parâmetros de entrada que dão origem aos cálculos e associações necessárias para a definição do objeto. Tais parâmetros foram organizados em função da referência a partir da qual poderiam ser obtidos – sítio ou produto – a fim de estabelecer qual a relação entre eles e as operações a serem realizadas. Também foram sugeridas formas de entrada para cada parâmetro identificado (QUADRO 08).

Quadro 08 – Características do sítio e do produto

Parâmetro	Referencia	Relação	Possível Entrada
Endereço	Sítio	Define o modelo de ocupação	Selecionar o modelo de ocupação
Forma do terreno	Sítio	Define área e dimensões, com isso interfere em afastamentos, área construída e área ocupada	Desenho no próprio modelo
Caixa da rua	Sítio	Parte da definição de altura máxima	Desenho no próprio modelo
Uso	Produto	Influencia no modelo de ocupação a ser adotado	Selecionar o modelo de ocupação
Porte	Produto	Define a necessidade de vagas e por consequência pode limitar a área construída	Informação numérica por parte do projetista
Programa	Produto	Define a área média da unidade	Informação numérica por parte do projetista

Fonte: Autor

Na terceira etapa dos estudos, além dos parâmetros de entrada, são estabelecidos parâmetros internos ao código de obras que são responsáveis por complementar os dados necessários para a composição do volume arquitetônico. Complementando, a análise foram levantadas as operações requeridas para a definição de gabarito, coeficiente de aproveitamento, taxa de ocupação, recuos e afastamentos (Quadro 09), com o objetivo de identificar o conjunto de fórmulas a serem utilizadas para programação do algoritmo.

Quadro 09 – Parâmetros e operações

Parâmetros	Gabarito permitido
	Zoneamento
	Possibilidade de construção do empreendimento no local (uso)
	Modelo de ocupação: Coeficiente de aproveitamento Taxa de ocupação Afastamento frontal Afastamento lateral e fundos Área permeável
	Diâmetros de ventilação: Permanência Transitória Área de varanda
Operações	$H = (2 \times \text{caixa da rua}) + (2 \times \text{afastamento})$
	$APT = \text{área do terreno} \times \text{coeficiente de aproveitamento}$
	Número máximo de pavimentos = $APT / \text{taxa de ocupação}$
	$H = \text{número de pavimentos} - 2 \times \text{pisos a piso}$
	Diâmetro de ventilação: Área aberta: $D = 1,5 + h/8$ Área semi aberta: $D = 1,7 + h/6$ Área fechada (Residencial e Salas Comerciais) = $D = 2,0 + h/4$ Área fechada (Lojas e Galpões) = $D = 2,0 + h/6$ Permanência Transitória = $D = 1,5 + h/10$
	Profundidade máxima: 4,0 (quatro) vezes o valor do pé direito, quando o vão abrir para área fechada ou semiaberta; 4,5 (quatro e meia) vezes, quando abrir para área lateral ou aberta e 5,0 (cinco) vezes quando abrir diretamente para logradouro. Nos estacionamentos ou garagens será admitido o dobro das distâncias citadas no caput deste artigo, desde que exista ventilação permanente em pelo menos duas paredes opostas ou nos tetos (ventilação cruzada) e que atenda às seguintes condições: I - as áreas dos vãos possuam, no mínimo, 1/20 (um vigésimo) da área do piso da garagem; II - as áreas dos vãos nunca forem inferiores à metade das áreas dos vãos opostos; III - os vãos nunca se distanciarem mais do que 5,0m (cinco metros) da parede limite da garagem.

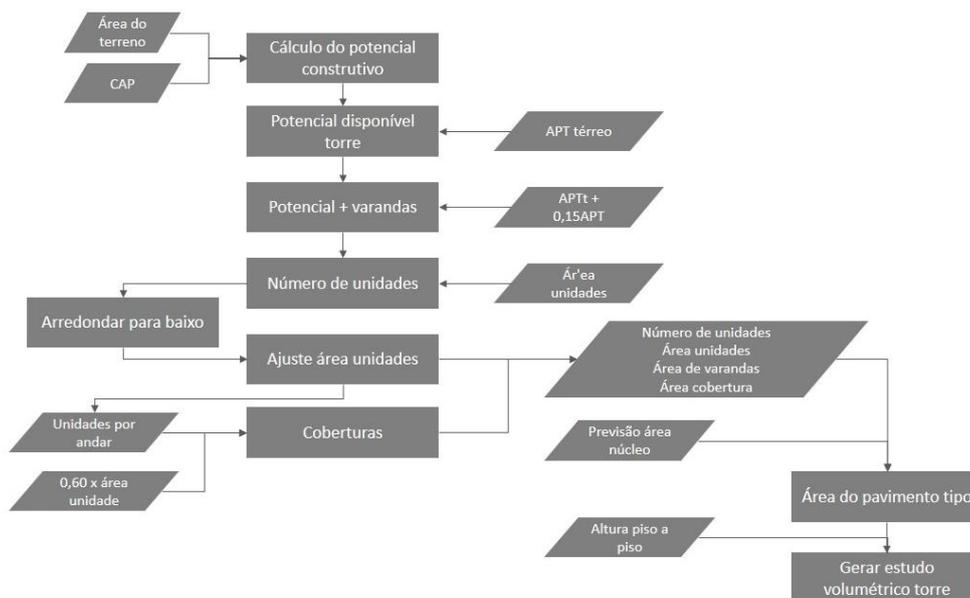
Fonte: Autor

Em uma quarta etapa, foi feito um mapeamento do processo dos estudos de viabilidade, com o objetivo de estabelecer a sequência de operações a serem incluídas no algoritmo de

programação. Posteriormente, os dados obtidos foram estruturados em fluxogramas de processamento, buscando uma organização visual semelhante ao algoritmo utilizado pelo Grasshopper, procurando, assim, simplificar a transição para o meio digital.

Os modelos de ocupação estipulados pelo código de obras apresentam duas tipologias básicas de edifícios, uma delas composta por um volume único do térreo até o nível mais alto, com possibilidades de escalonamento, a qual será aqui, chamada de Torre – modelos M1, M2, M3, M4 e M5. A segunda tipologia admitida é a Embasamento/Torre (M1A, M2A, M3A, M4A, M5A, M6A, M7A, M8A), que permite a criação de um volume inferior com maior taxa de ocupação e sem as limitações de afastamentos, aqui chamado de Embasamento – em geral utilizado para áreas comuns e uso comercial/serviços. A Torre, neste caso, é limitada por uma taxa de ocupação mais restritiva e concentra os usos residenciais, comercial e/ou serviços. Devido a relação entre estes elementos verificou-se que a forma de geração da torre poderia ser definida de forma comum para ambos os casos. O embasamento por sua vez, além de estar presente em apenas um dos tipos, necessita de informações referentes às soluções adotadas para a torre para definir suas dimensões e, sendo assim, verificou-se a necessidade de sua criação em uma sequência separada. Com isso se apresentam os dois fluxogramas abaixo que demonstram os processos desde a área do terreno até o estudo volumétrico (Figura 02 e Figura 03).

Figura 02 – Fluxograma de geração de estudos de massa - torre

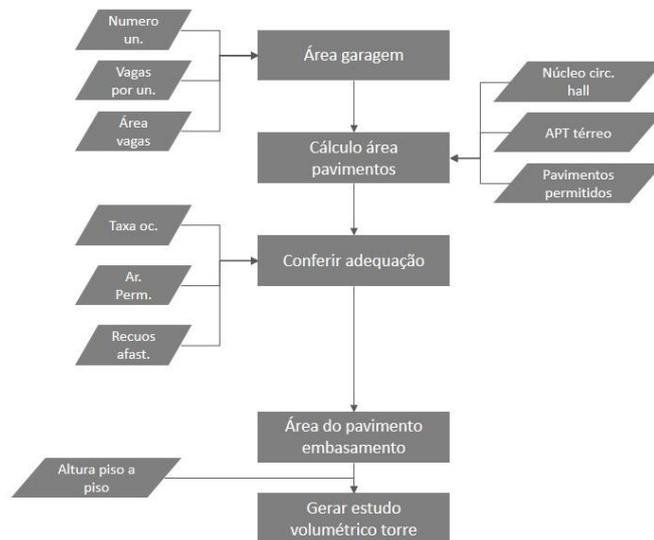


Fonte: Autor

Para a construção da torre, parte-se da área do terreno e do coeficiente de aproveitamento para se calcular o potencial construtivo base. Deste valor deve ser subtraído o valor de qualquer área privativa existente além do uso principal do edifício. Logo após esta etapa, podem ser aplicados os valores extra permitidos pelo código de obras, para varandas, levando ao potencial construtivo total disponível para as unidades. Deste valor e sua relação com a área das unidades se estabelece o número de unidades. A partir da entrada de unidades por andar se define a possibilidade da criação de coberturas e por consequência da utilização de seu potencial extra permitido. Por fim, com a entrada da área do núcleo e circulação e da altura piso a piso, se define a área do pavimento tipo e com isso se consegue definir o volume da torre.

Com base no relatório do número de unidades presente na torre, em conjunto com o número de vagas por unidade e pela área média das vagas, se consegue definir a área de garagem. A partir deste número se define a área necessária para os pavimentos do embasamento, sua possibilidade de construção. Por fim, com a inclusão do núcleo e circulações, área privativa no embasamento tem-se a área do pavimento de embasamento, que, em conjunto com a altura piso a piso leva à construção do volume do embasamento.

Figura 03 – Fluxograma de geração de estudos de massa – embasamento



Fonte: Autor

Com base nas etapas apresentadas, foi possível identificar as principais entradas, saídas e processamentos presentes na legislação municipal a serem aplicados na produção do algoritmo, como se vê no Quadro 10 abaixo. Ao longo da construção do algoritmo estas informações foram o ponto de partida, mas precisaram ser adaptadas de acordo com as necessidades específicas do processo de programação.

Quadro 10 – Inputs, outputs e processamentos identificados

Inputs	Outputs	Processamentos
<ul style="list-style-type: none"> • Modelo de ocupação • Desenho do terreno • Vias • Área privativa do térreo • Área das unidades • Unidades por andar • Altura piso a piso • Área do núcleo e circulação • Vagas por unidade comum • Vagas por unidade cobertura • Área equivalente de vagas • Área permeável permitida • Área extra de varandas • Área extra de cobertura 	Área do terreno	Identificação da área em função da figura
	Testada	Extensão comum entre o terreno e o limite da via
	Taxa de ocupação da base	Valores referenciados em função da seleção do modelo de ocupação
	Taxa de ocupação da torre	
	Coefficiente de aproveitamento	
	Recuo frontal	
	Afastamento lateral e fundos	
	Permitido colar em uma das divisas	
	Embasamento número de pavimentos	
	Potencial construtivo	Área do terreno x coeficiente de aproveitamento
	Potencial disponível torre	Potencial construtivo – área privativa do térreo
	Potencial incluindo varandas	Potencial disponível torre x área extra de varandas
	Número definido de unidades	Potencial incluindo varandas / área das unidades
	Área da unidade	Ajuste da área da unidade inicial em função do potencial construtivo e do número definido de unidades
	Área de varanda por unidade	Área da unidade x área extra de varandas
	Área da cobertura	Área da unidade x área extra de cobertura
	Número de pavimentos	Número de unidades / unidades por andar
	Área do pavimento	Unidades por andar x (área das unidade + área de varanda por unidade)
	Altura da torre	Número de pavimentos x altura piso a piso
	Frente do pavimento	Testada – (2x afastamento lateral)
	Lateral do pavimento	Área do pavimento / frente do pavimento
	Total de vagas por unidade comum	Número de unidade comuns x vagas por unidade comum
	Total de vagas por unidade cobertura	Número de unidade cobertura x vagas por unidade cobertura
	Total de vagas	Vagas un. comum + Vagas un. cobertura
	Área total de garagem	Total de vagas x área equivalente de vagas
	Área total de núcleos e circulações	Número de pavimentos x área de núcleo/circulação
	Área total do embasamento	Área total da garagem + área total de núcleos/circ.
	Adequação à taxa de ocupação	Comparar área do pavimento à taxa de ocupação
	Adequação à área permeável	Comparar área do pavimento à área permeável
	Lateral do embasamento	Área do embasamento / testada
Volume tridimensional da torre	Composição: base da torre x altura da torre	
Volume tridimensional do embasamento	Composição: base do embasamento x altura do embasamento	

Fonte: Autor

5. DESENVOLVIMENTO DO ALGORITMO

Para a pesquisa, foi proposta a criação de um algoritmo capaz de gerar estudos de massa a partir das exigências do código de obras da cidade de Juiz de Fora. Tal algoritmo deveria ser capaz de gerar estudos específicos para terrenos individuais, mas também deveria possibilitar a simulação do espaço urbano a partir da abordagem conjunta de diversos terrenos. Sendo assim, de acordo com o que foi discutido nos capítulos anteriores, e com o mapeamento do processo dos estudos de viabilidade, cabe uma consideração sobre as particularidades das duas abordagens adotadas para o estudo.

A construção do algoritmo pode ser dividida em cinco classes diferentes de parâmetros, (1) Dados de Entrada Genéricos, (2) Dados do Ambiente, (3) Dados de Entrada Específicos, (4) Operações e (5) Dados de Saída.

No contexto da pesquisa, o roteiro para a adequação de um projeto ao código de obras de Juiz de Fora tem como primeiro objetivo identificar o modelo de ocupação a ser adotado, pois é a partir dele que se definem os parâmetros de coeficiente de aproveitamento, taxa de ocupação, afastamento frontal mínimo, afastamento lateral e de fundos mínimo, área mínima e testada mínima a serem adotados. Os modelos de ocupação da legislação (ANEXO 01) se aplicam a qualquer tipo de edificação proposta, sendo que, apenas os valores específicos se modificam, assim, se justifica a classificação como (1) Dado de Entrada Genéricos. No algoritmo, foi importante que a seleção do modelo de ocupação gerasse automaticamente os valores para cada um dos parâmetros mencionados, visto que as demais operações dependem destas definições.

Os (2) Dados do Ambiente são específicos para cada projeto, também são os únicos que não apresentam possibilidade de variação. Eles são a relação do produto com o espaço físico em que ele irá se inserir. Com o desenho do terreno, dado de projeto, e de seu entorno são definidas as dimensões de testada, demais divisas e caixa da rua, além de sua área total e suas características topográficas. Tais dados são os elementos geradores do volume construído, eles definem tanto a posição do objeto quanto os limites principais volumetria, que posteriormente será modelada em função das restrições do modelo de ocupação.

O estudo de viabilidade parte de um cenário inicial apresentado pelo cliente, nele são definidos os valores desejados para área das unidades, número de vagas por unidade e área de lojas (área privativa no térreo). A partir destes valores, passa-se a trabalhar com os limites apresentados pelo modelo de ocupação para se chegar às características do produto a ser trabalhado nas fases posteriores de projeto. Ainda neste momento alguns outros parâmetros precisam ser definidos para que se complemente as informações necessárias. O projetista

trabalha com o número total de unidades, número de unidades por andar, altura piso a piso, área de núcleo/circulação, e área equivalente das vagas para conseguir gerar uma edificação que explore ao máximo o potencial construtivo do terreno. Sendo assim, nesta etapa são apresentados (3) Dados de Entrada Específicos, que junto aos dados do ambiente, são os responsáveis pelas variações verificadas no espaço urbano em termos de volumetria.

Vale citar como outro elemento gerador importante, o gabarito máximo, que é constante para qualquer projeto e se dá a partir da relação com dos dados do ambiente com os dados de entrada específicos. A partir da caixa da rua e do afastamento frontal adotado se define a altura máxima admitida para a edificação

Até este ponto, foram relatados os *inputs* para geração de estudos volumétricos através do algoritmo, no entanto, as (4) Operações são o que caracteriza sua principal função. A partir dos dados de entrada e do ambiente, o programa define todos os valores para coeficiente de aproveitamento, taxa de ocupação, afastamento frontal mínimo, afastamento lateral e de fundos mínimo, área mínima e testada mínima a serem adotados. Neste momento são realizados os cálculos de potencial construtivo, número de unidades adotado, área das unidades, área do pavimento, altura da edificação e total de vagas. Em suma, é neste momento que se fazem todos os cálculos, comparações e ações necessárias para geração do produto.

Por fim, a partir dos *inputs* e das operações, são produzidos os (5) Dados de Saída que podem ser caracterizados como a formalização do estudo, quando são gerados os volumes tridimensionais representando a ocupação máxima do terreno de acordo com os limitadores apresentados.

5.1. CONSIDERAÇÕES SOBRE A PESQUISA E A PROGRAMAÇÃO

A pesquisa relata o desenvolvimento de um algoritmo de projeto, bem como os resultados alcançados a partir de seu uso, pois busca explorar, através de uma experimentação prática do algoritmo para gerar estudos de massa, as implicações do uso deste tipo de ferramenta no processo de projeto. Não se buscou a produção de um algoritmo de suporte ao desenvolvimento e viabilização do projeto em si, mas compreender as particularidades de sua criação, tanto do ponto de vista da lógica de desenvolvimento da arquitetura, quanto da operacionalização de métodos digitais, no que concerne à legislação urbana. As etapas apresentadas a seguir tornam explícitas a evolução e transformação do algoritmo, bem como buscam proporcionar uma base para as discussões e as análises na dissertação.

5.2. CONSTRUÇÃO DO ALGORITMO E HISTÓRICO DE VERSÕES

O desenvolvimento do algoritmo objeto desta dissertação se deu ao longo de três versões criadas de acordo com a complexidade de objetivos e programações. Sua evolução se deu através do acréscimo de funcionalidades e da busca por melhorias na lógica de reconhecimento do ambiente e nas operações realizadas. Na Versão 1.0 verificou-se a viabilidade de se desenvolver o algoritmo e, como versão de teste, teve como meta sua aplicação em um único terreno. Sendo abordadas, parcialmente, as definições de produto (que variam para cada caso a ser estudado), e as limitações da legislação (que são fixas).

A partir dos testes iniciais se definiram as metas para a segunda versão (Versão 1.1). Ela, ainda trabalhando com um único terreno, teve como foco três questões: a abordagem da topografia; maior eficiência e transparência nas operações e a correção de inconsistências verificadas ao longo do processo.

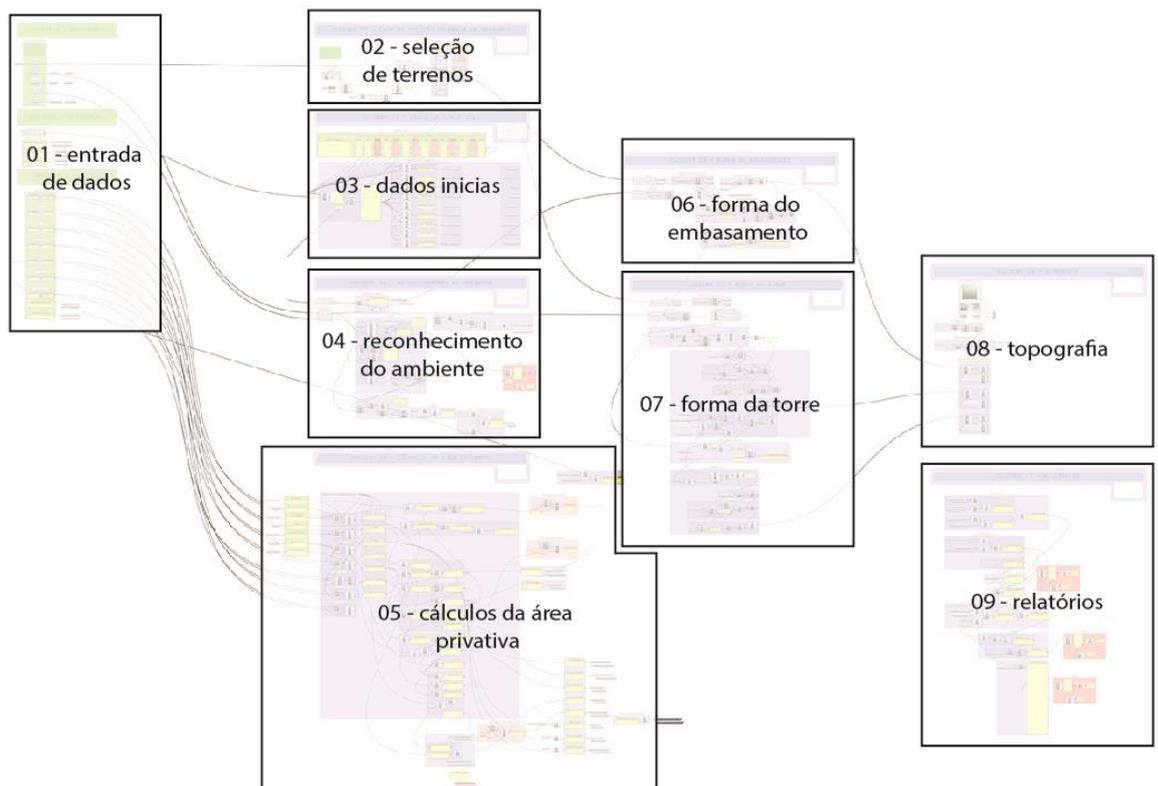
A última versão para esta dissertação (Versão 1.2) foi desenvolvida com o objetivo de ampliar o uso do algoritmo além dos estudos individualizados, isto é, para a geração de formas a partir de vários terrenos, assim, viabilizando simulações de espaços mais complexos e amplos, incluindo o contexto global das cidades. Buscando-se aliar a automação das operações e do reconhecimento do ambiente com a variabilidade formal presente nas cidades, a partir dos testes realizados nas versões iniciais, adotou-se como premissa principal, coordenar as ações do algoritmo para que o processo como um todo fosse percorrido individualmente para cada terreno. A seguir é apresentado o algoritmo desenvolvido para a versão 1.2.

5.3. DESCRIÇÃO DO ALGORITMO DE PROJETO

Previamente à apresentação do algoritmo em si, vale ressaltar que, Em função das especificidades dos softwares escolhidos, a entrada de dados se dá de duas formas distintas, no *Rhinoceros* e no *Grasshopper*. No primeiro, são fornecidos os dados do ambiente através de desenhos que servirão de suporte para as operações realizadas pelo algoritmo (ruas, calçadas, limites dos terrenos). No segundo, o usuário complementa os *inputs* com o modelo de ocupação e os dados de produto (área computável do térreo, área das unidades, unidades por andar, altura piso a piso, área do núcleo/circulação, vagas por unidade comum, vagas por unidade de cobertura e área equivalente das vagas).

O algoritmo é formulado com grupos de operações (*clusters*), em função de suas ações no contexto da programação. Sendo assim, a organização inicial se deu por: 01 – Entrada de Dados, 02 – Seleção Ordenada de Terrenos (controle do loop), 03 – Dados Iniciais, 04 – Reconhecimento do Ambiente, 05 – Cálculos da Área Privativa, 06 – Forma do embasamento, 07 – Forma da Torre, 08 – Topografia e 09 – Relatórios (Figura 04).

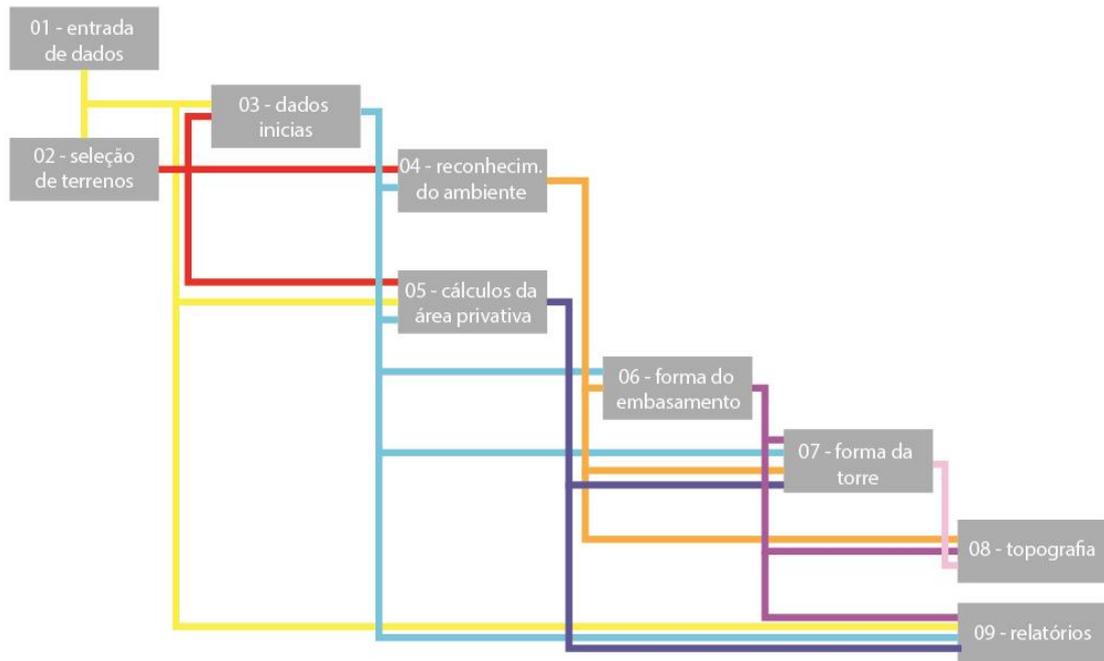
Figura 04 – Mapa de grupos do algoritmo



Fonte: Autor

Os *clusters* 01 – Entrada de Dados, 02 – Seleção Ordenada de Terrenos (controle do loop), não fazem parte do processo de criação de volumes para os estudos de massa, no entanto, são necessários como input principal e, também, devido à organização dos fluxos no algoritmo. Com isso, visa-se garantir que todo o processo seja realizado particularmente para cada terreno, impedindo a indesejável sobreposição de informações. Os grupos 03 – Dados Iniciais, 04 – Reconhecimento do Ambiente, 05 – Forma do embasamento, 06 – Cálculos da Área Privativa, 07 – Forma da Torre, 08 – Topografia são responsáveis por transformar os inputs em volumetrias. Além disso, para possibilitar futuras análises de área total construída, população e fluxos de pessoas e veículos, foi previsto o grupo de 09 – Relatórios. A Figura 05 apresenta as conexões entre os *clusters* citados acima.

Figura 05 – conexões entre os grupos



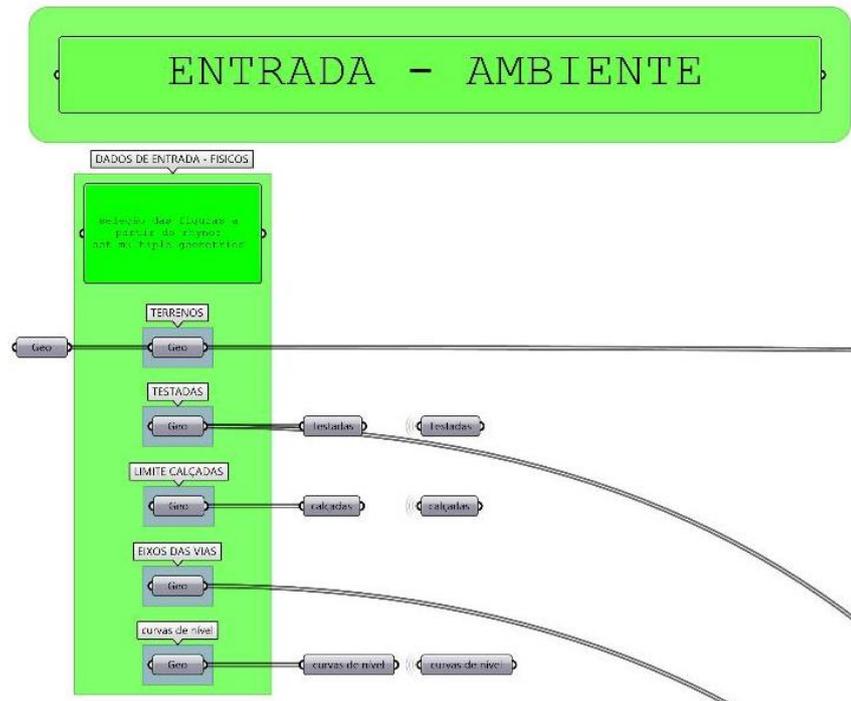
Fonte: Autor

5.3.1 Grupo entrada de dados

Apesar do algoritmo poder ser acessado por completo, este é o único *cluster* em que as ações do usuário são necessárias. Para uma melhor interface homem-máquina-sistema, este grupo foi dividido em três atividades: “entrada – ambiente”, “entrada – legislação” e “entrada – produto”.

A “entrada – ambiente” (Figura 06), possibilita o reconhecimento dos desenhos inseridos no *Rhinceros*. Através de componentes “*geometry*” o usuário informa ao *Grasshopper* as figuras a serem importadas, bem como sua classificação em terrenos, testadas, limite das calçadas, eixo das vias e curvas de nível.

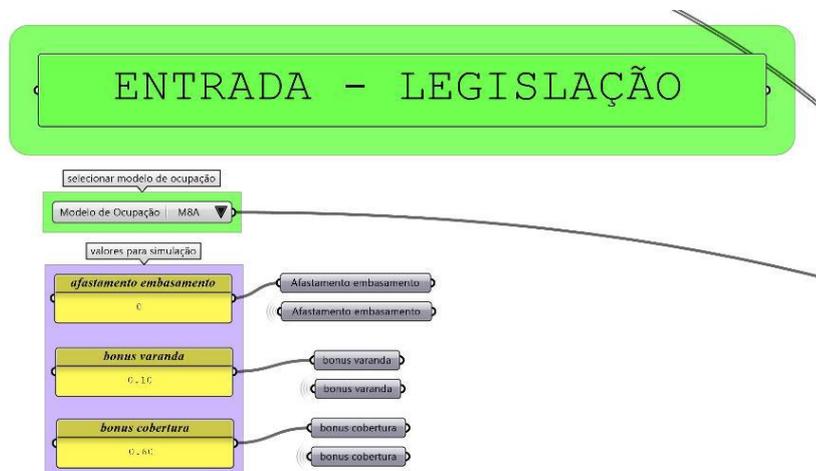
Figura 06 – entrada de dados do ambiente



Fonte: Autor

Na área de “entrada – legislação” (Figura 07), se seleciona o modelo de ocupação da legislação a ser utilizado no estudo. A partir dele, se aplicam todos os parâmetros pré-definidos no código de obras. Além disso, também devem ser inseridos os valores de “afastamento do embasamento”, “bônus de varanda” e “bônus de cobertura”, assim se pretende viabilizar estudos de variação nos parâmetros da legislação.

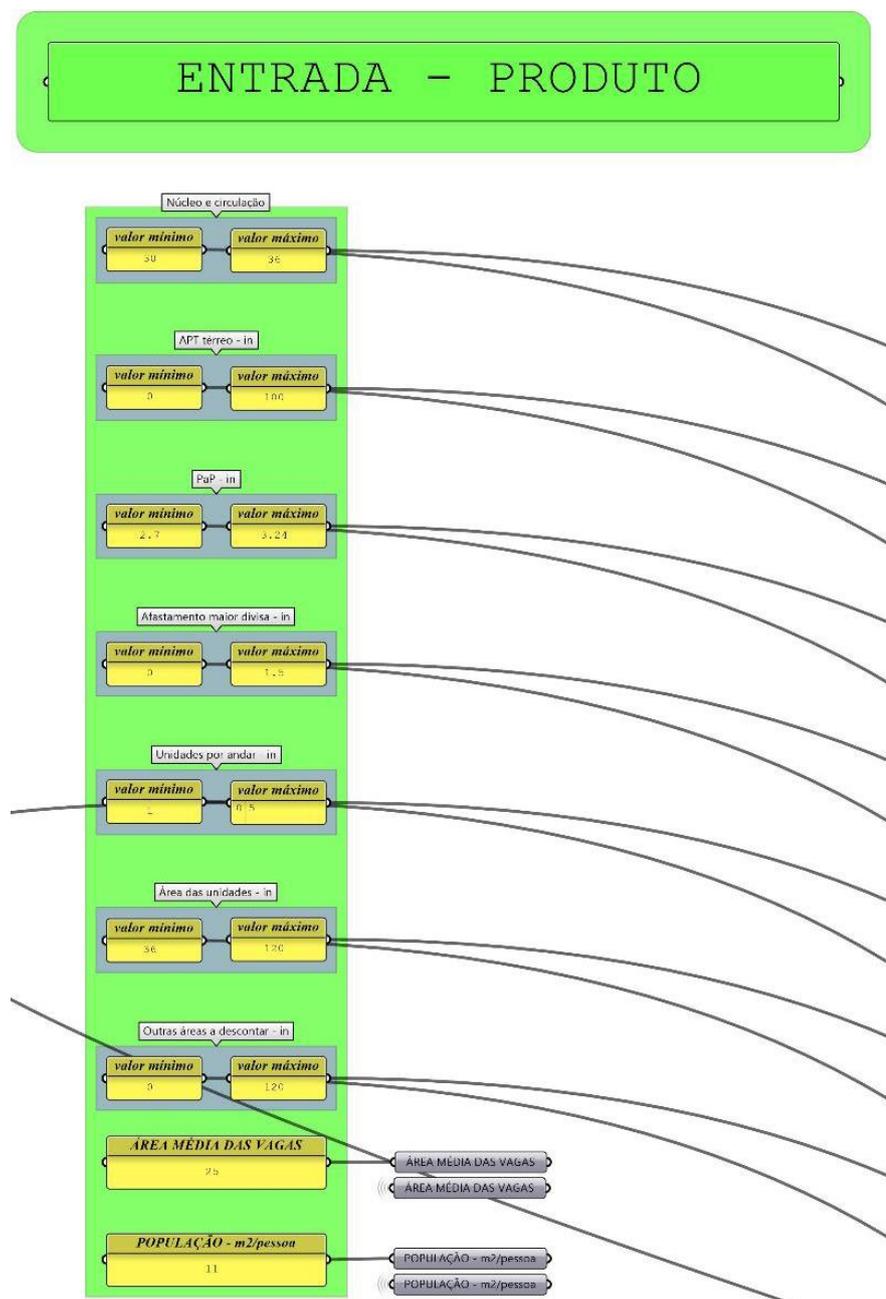
Figura 07 – entrada de dados do legislação



Fonte: Autor

A “entrada – produto” (Figura 08), concentra opções individualizadas para cada projeto. Os valores informados nesta atividade são: (1) núcleo e circulações, (2) Área privativa do térreo, (3) Piso a Piso, (4) Afastamento da maior divisa, (5) unidades por andar, (6) Área das unidades, (7) outras áreas a descontar, (8) Área média das vagas e (9) População – m² por pessoa. Neste subgrupo, foram criados painéis para entrada de valores mínimos e máximos para cada parâmetro, a partir destes limites o algoritmo gera valores aleatórios para cada terreno em estudo. No caso de terrenos individuais, estes valores podem ser inseridos de forma direta.

Figura 08 – entrada de dados do produto



Fonte: Autor

Para garantir a utilização do algoritmo em conjuntos de terrenos, e, ainda assim, permitir os estudos para terrenos individualizados, nesta terceira atividade, para cada parâmetro, existem formas diferentes de se inserir os dados. No caso dos valores de (1) – (3) – (4) – (6) e (7) os limites mínimos e máximos são definidos pelo usuário em função de opções do estudo.

Os valores de (5) – (2), são definidos em função das limitações do próprio ambiente, que são: taxa de ocupação, área permeável e área das unidades. Neste caso, os limites são definidos pelo próprio algoritmo a partir de operações realizadas em outros grupos.

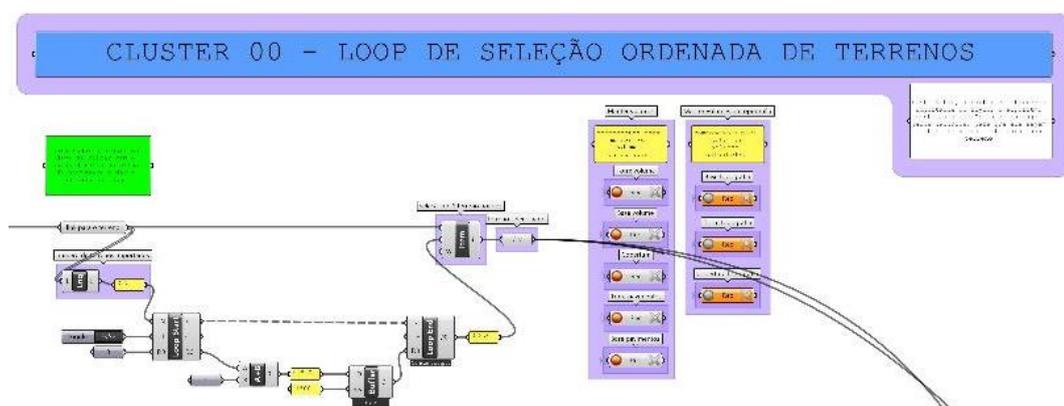
Com os intervalos de dados definidos, no caso dos estudos para conjuntos de terrenos, os valores a serem adotados pelo algoritmo para cada um dos parâmetros são definidos de forma aleatória. Por outro lado, nos estudos em terrenos individualizados, estes valores podem ser inseridos diretamente pelo usuário.

5.3.2 Grupo *loop* de seleção ordenada de terrenos

Tendo em vista a premissa principal da Versão 1.2, que se baseia na coordenar as ações do algoritmo para que o processo como um todo seja percorrido particularmente para cada terreno, foi necessário criar este grupo, responsável pelo controle do fluxo de dados.

Neste grupo, a partir das figuras importadas na entrada de dados, o algoritmo reconhece os terrenos e calcula seu número total. Com base em listagens e indexações, seleciona-se um dos terrenos e a partir daí percorre-se o restante do algoritmo até a geração do estudo de massa. Para garantir que esta ação seja repetida em *loop* para todos os terrenos foi necessária a utilização do *plugin*⁸ “*Hoopsnake*” (Figura 09).

Figura 09 – *loop* de seleção ordenada de terrenos



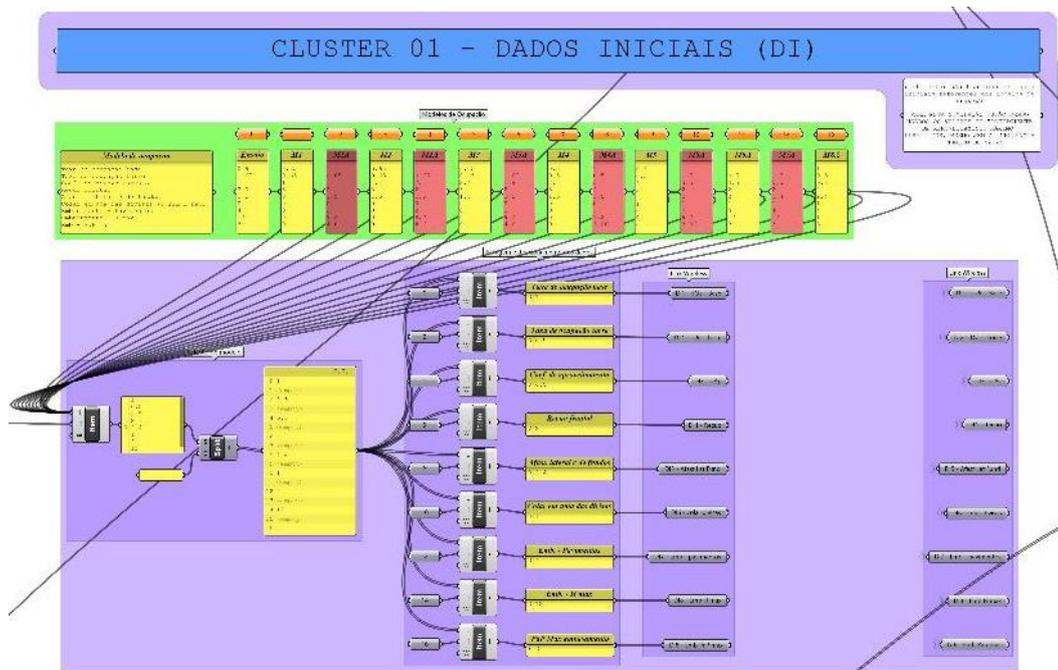
Fonte: Autor

⁸ *Plugin*: aplicação que acrescenta uma funcionalidade adicional ou uma nova característica a um software.

5.3.3 Grupo dados iniciais

O objetivo deste grupo é atribuir os devidos valores aos parâmetros do código de obras de forma individualizada em função do modelo de ocupação selecionado. A configuração dos parâmetros do código de obras é feita através de painéis textuais específicos para cada modelo de ocupação. Nestes painéis são inseridos os valores para: taxa de ocupação base, taxa de ocupação torre, coeficiente de aproveitamento, recuo, afastamento lateral e fundos, colar em uma das divisas, pavimentos do embasamento, altura máxima do embasamento e embasamento. Ao total estão disponíveis 14 painéis, 13 deles são os modelos de ocupação definidos no código de obras da cidade de Juiz de Fora e 1 deles é específico para ensaios (Figura 10).

Figura 10 – dados iniciais



Fonte: Autor

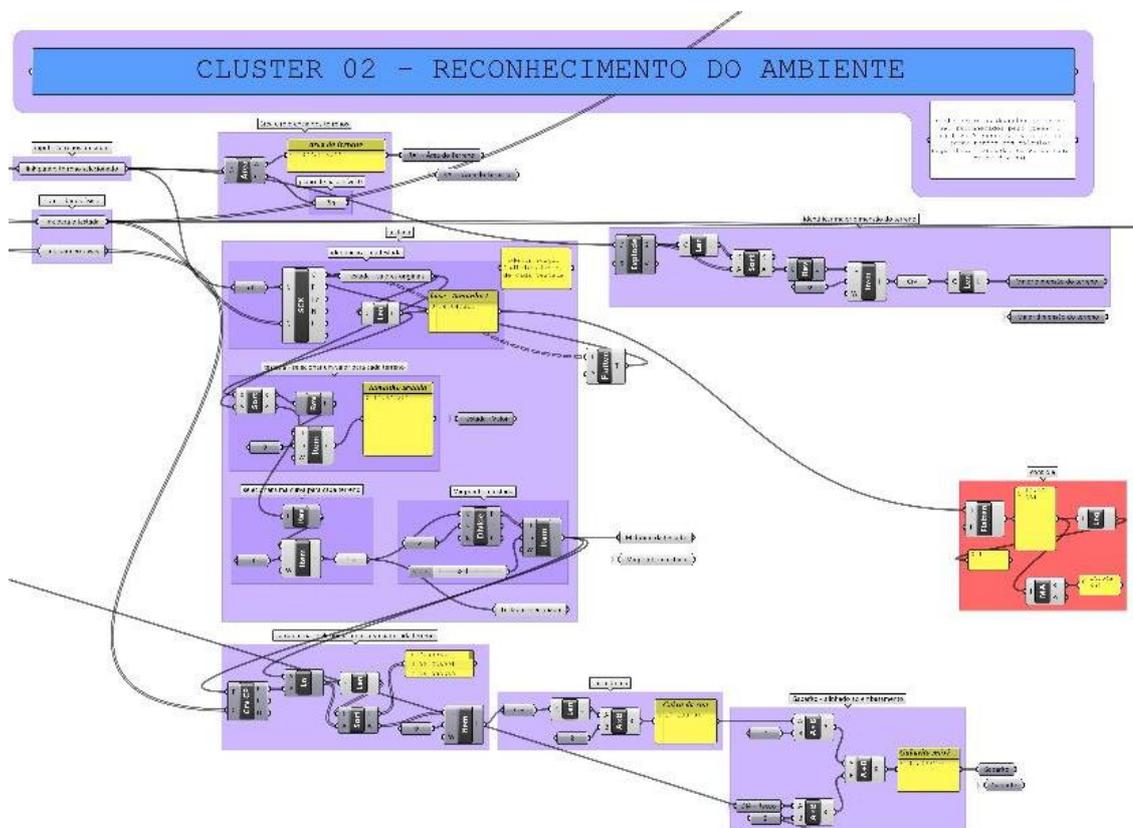
5.3.4 Grupo reconhecimento do ambiente

Neste grupo (Figura 11), os dados de entrada do ambiente são reconhecidos pelo *Grasshopper*. Os *inputs* desta fase são: os terrenos selecionados pelo algoritmo a partir do loop de seleção ordenada de terrenos, as testadas dos terrenos nas quadras e os eixos das vias ambos reconhecidos a partir dos desenhos no *Rhinceros*. Os passos realizados nesta etapa são: (1)

cálculo da área do terreno, (2) identificação da testada individual do terreno e (3) identificação da caixa da rua.

O (1) cálculo da área do terreno se dá de forma direta a partir da figura. Para (2) identificação da testada individual do terreno foi necessário criar um mecanismo de comparação capaz de identificar a interseção entre a figura do terreno e as testadas dos terrenos na quadra. A (3) identificação da caixa da rua é definida em função da distância entre a testada individual do terreno e o eixo das vias.

Figura 11 – reconhecimento do ambiente

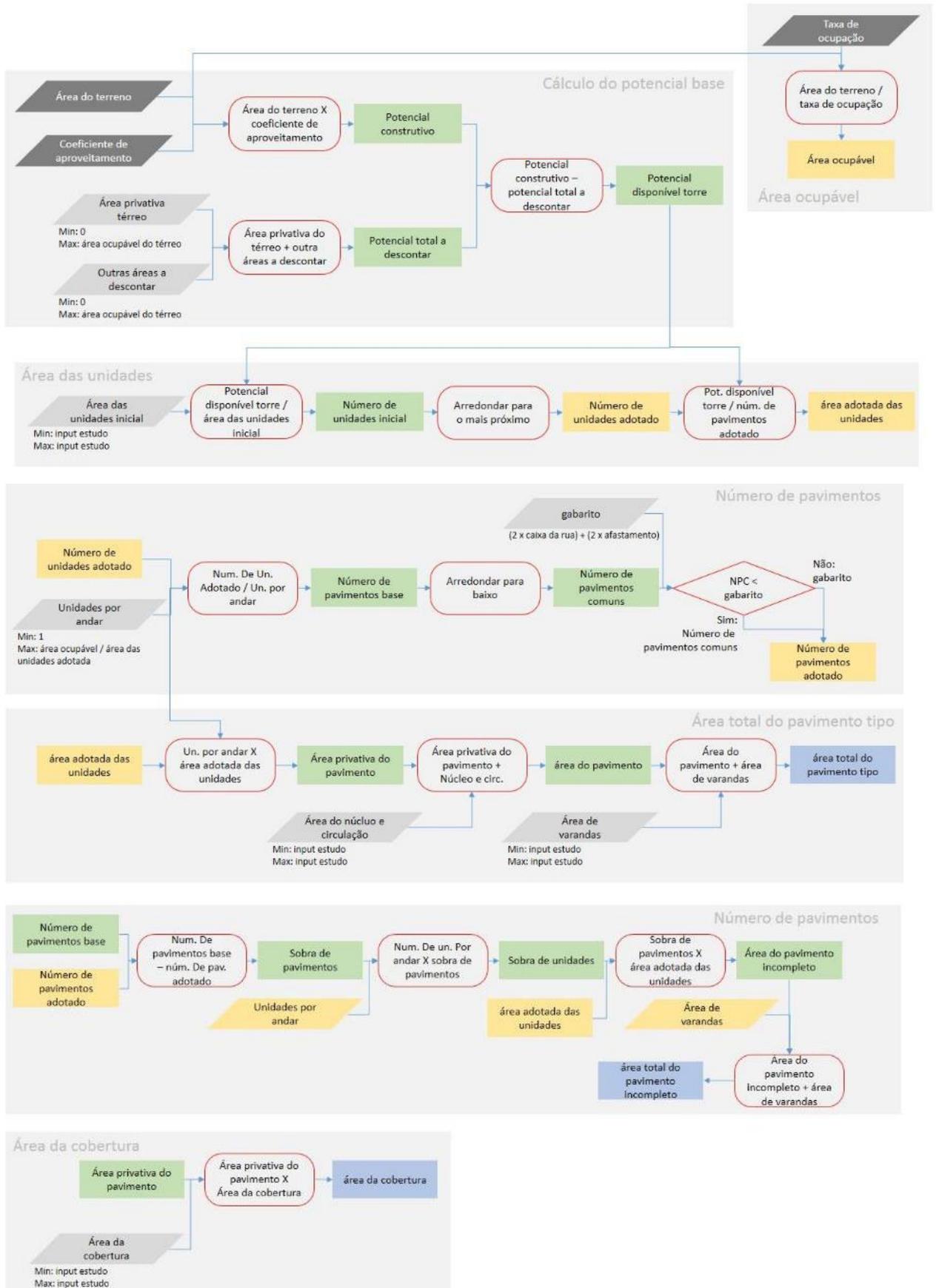


Fonte: Autor

5.3.5 Grupo cálculos de áreas privadas

Para esta fase, a partir do mapeamento dos estudos de viabilidade, foi desenvolvido um fluxograma com a sequência de ações que leva dos dados iniciais às definições das dimensões adotadas para o estudo (Figura 12).

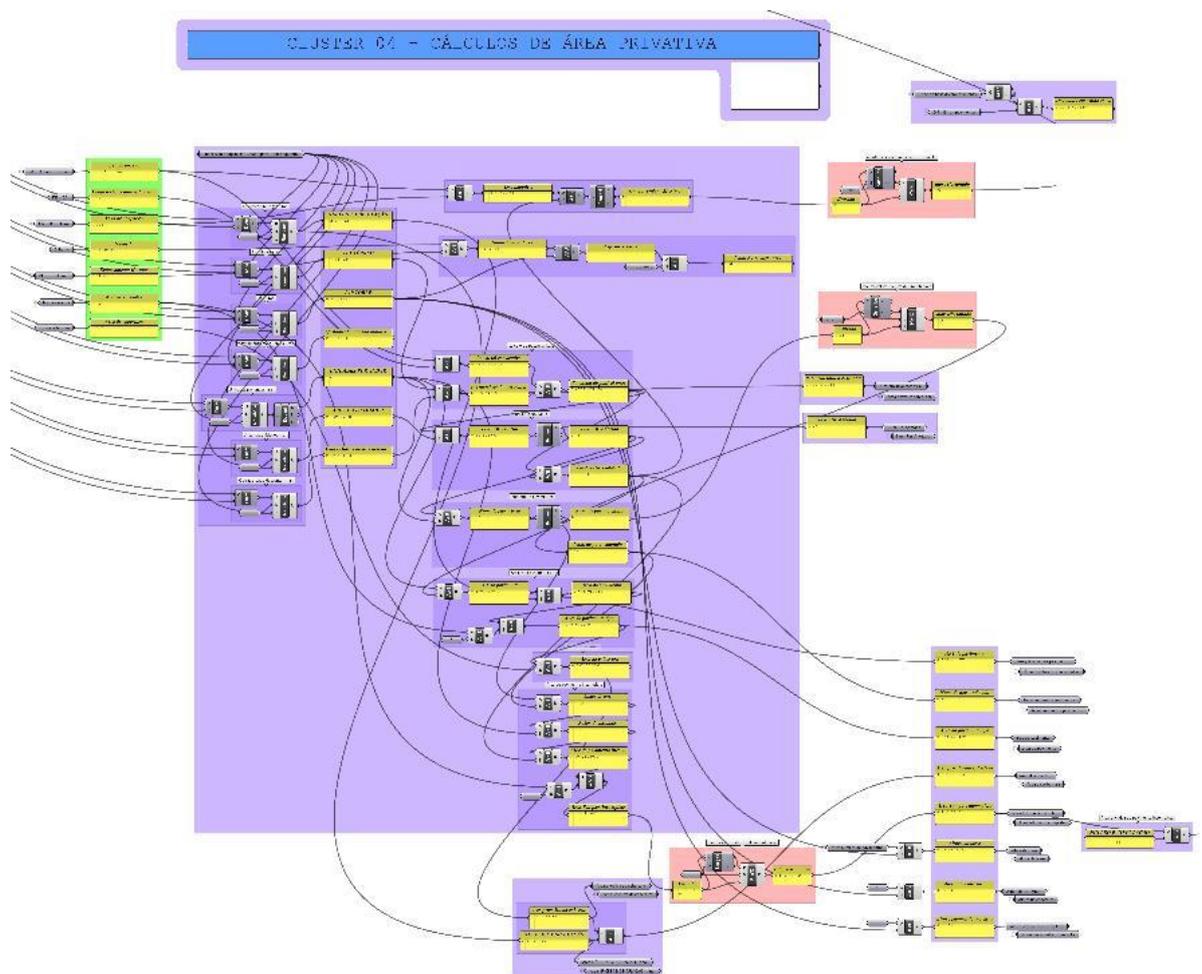
Figura 12 – Fluxograma da definição da área dos pavimentos das torres



Fonte: Autor

Neste grupo (Figura 13), a partir dos dados de entrada (área do terreno, coeficiente de aproveitamento, taxa de ocupação, área privativa do terreno, outras áreas a descontar, área das unidades inicial, gabarito, unidades por andar, área do núcleo e circulação, área de varandas, área da cobertura) o algoritmo replica a sequência do fluxograma realizando todos os cálculos necessários e gerando as saídas de: área total do pavimento tipo, área total do pavimento incompleto e área da cobertura.

Figura 13 – cálculos de área privativa



Fonte: Autor

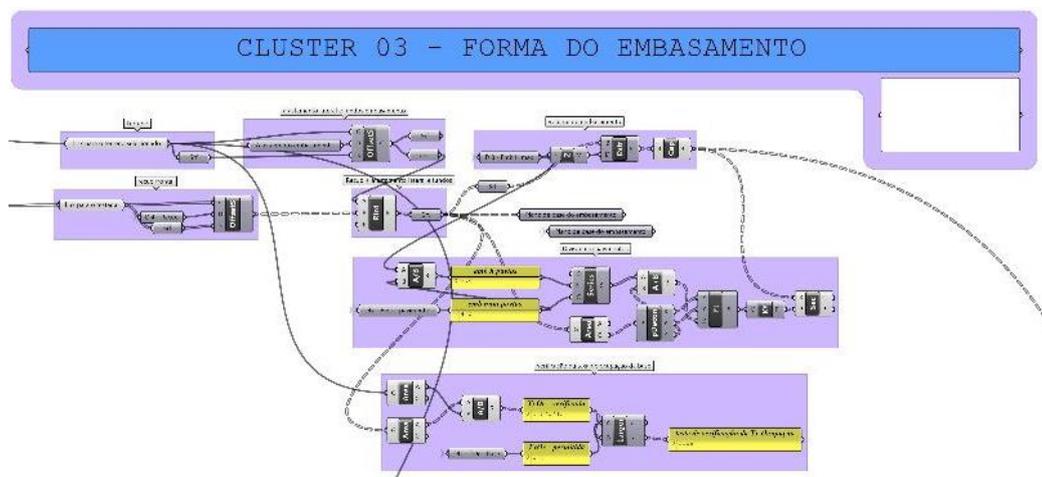
5.3.6 Grupo forma do embasamento

Este grupo (Figura 14) é o responsável por transformar os dados numéricos referentes ao embasamento em um estudo volumétrico. A figura do embasamento é formada a partir da

extrusão de seu plano de base no sentido vertical por uma distância igual à altura máxima permitida pelo código de obras.

O plano de base, é definido em função da figura do terreno, subtraindo-se o recuo obrigatório e os afastamentos lateral e de fundos escolhidos. Além disso é necessária a validação desta figura em função da área permeável, também obrigatória. Após a criação do volume se aplicam as divisões visuais do embasamento em pavimentos através das quais posteriormente serão realizados os relatórios de área.

Figura 14 – Forma do embasamento



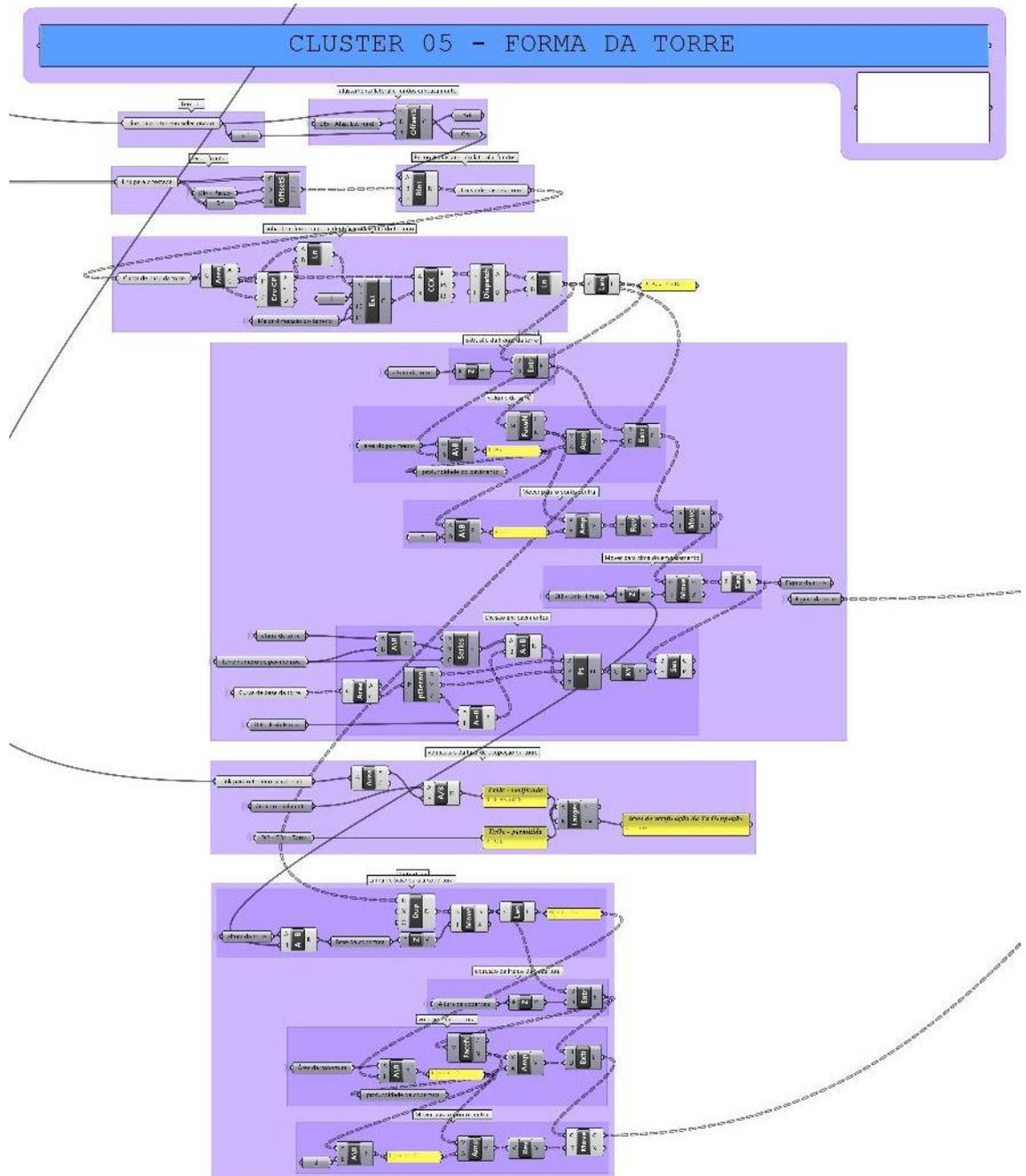
Fonte: Autor

5.3.7 Grupo forma da torre

Este grupo (Figura 15), assim como o anterior é o responsável por transformar os dados numéricos em um estudo volumétrico. A figura da torre neste caso é criada de forma diferente. Inicialmente se obtêm a aresta frontal da base a partir da figura do terreno e dos afastamentos laterais. A seguir se faz a extrusão da aresta frontal no sentido vertical com a distância igual à altura da torre. Em uma terceira etapa, se faz a extrusão deste plano frontal na direção de sua normal. Neste caso a distância é obtida através da área total do pavimento, obtida em grupos anteriores, dividida pela extensão da aresta frontal da torre.

Com o volume da torre construído, a etapa seguinte faz o posicionamento do mesmo no centro do plano de topo do embasamento. Depois disso, se aplicam as divisões visuais do torre em pavimentos através das quais posteriormente, também, serão realizados os relatórios de área. Finalizando esta etapa se cria o volume da cobertura utilizando a mesma sequência de operações.

Figura 15 – Forma da torre

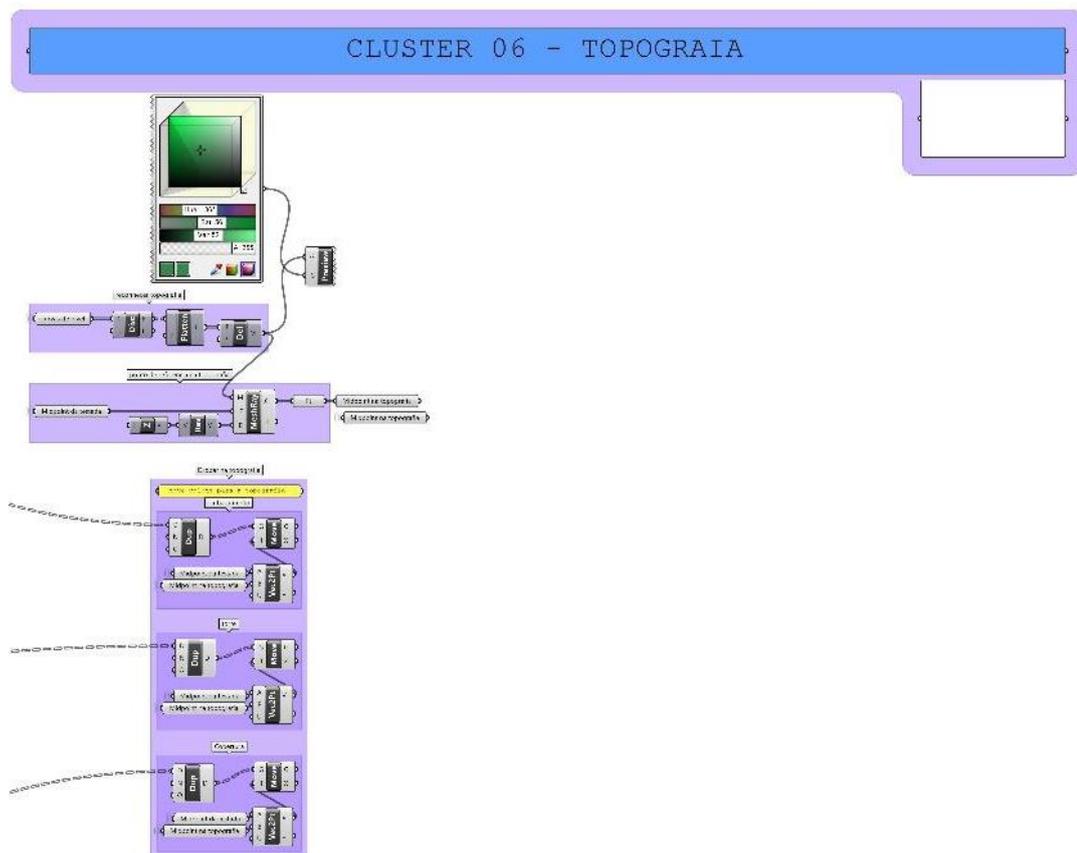


Fonte: Autor

5.3.8 Grupo topografia

Neste ponto do algoritmo, os volumes da torre e do embasamento foram criados e posicionados no terreno. No entanto, para conseguir simulações mais próximas à situações reais foi necessário criar a superfície topográfica da região em estudo. A partir das curvas de nível desenhadas no *Rhynoceros*, se cria a topografia do terreno através de ferramentas de superfície (Figura 16). Sobre a superfície criada os volumes são posicionados, tendo como referência da testada do terreno.

Figura 16 – Topografia



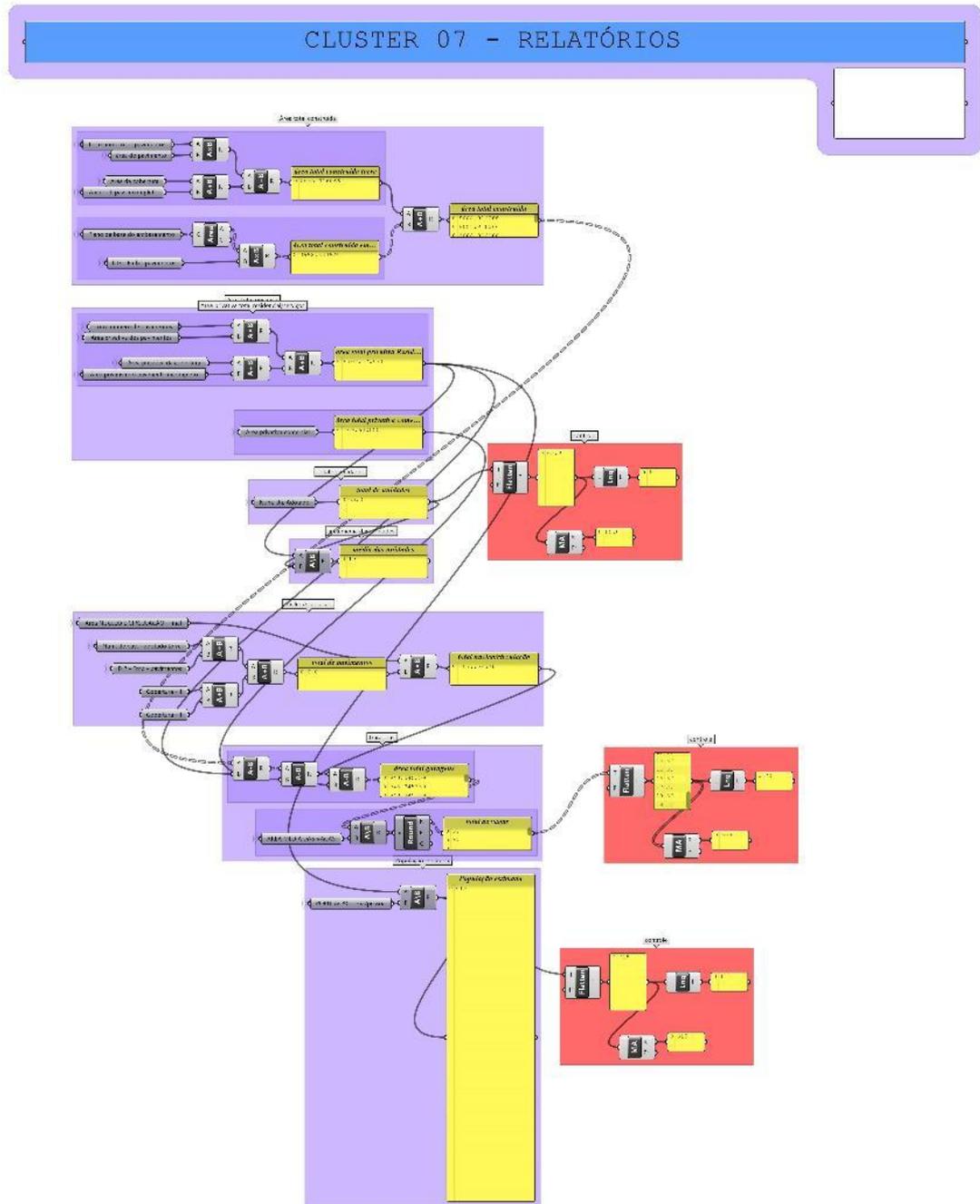
Fonte: Autor

5.3.9 Grupo relatórios

O grupo de relatórios (FIGURA 17), tem como objetivo fornecer dados numéricos que podem complementar os estudos formais. A partir dos resultados obtidos nas fases anteriores são criados os seguintes relatórios: (1) Área total construída da torre, (2) Área total construída do embasamento, (3) Área total construída, (4) Área total privativa residencial/serviços, (5)

Área total privativa comercial, (6) Área média das unidades, (7) Área total de núcleos e circulações, (8) Área total de garagens, (9) Total de vagas e (10) População estimada.

Figura 17 – Relatórios



Fonte: Autor

A seguir, o Quadro 11 resume o exposto anteriormente apresentando os objetivos de cada um dos grupos utilizados, bem como sua operacionalidade.

Quadro 11 – Grupos utilizados

Grupo	Objetivos	Operacionalidade
Entrada de dados	Reunir os inputs necessários para o processo	Importar os desenhos do Rhinoceros, informar o modelo de ocupação escolhido, inserir dados para simulações e inserir dados do produto
Seleção ordenada de terrenos	Controle do fluxo de dados no algoritmo	Informar ao algoritmo, particularmente, cada terreno para o qual será realizado o processo de geração de formas
Dados iniciais	Gerar os valores a serem usados para cada parâmetro	A partir da escolha do modelo de ocupação são atribuídos os devidos valores aos parâmetros da legislação
Reconhecimento do ambiente	Gerar os dados iniciais para os cálculos do algoritmo e para o posicionamento dos volumes	Identificar, a partir dos desenhos importados, os limites do terreno, área do terreno, caixa da rua, testadas.
Cálculo de áreas privadas	Calcular dimensões a serem aplicadas nos volumes	Processamento dos dados obtidos nas fases anteriores replicando o processo de estudo de viabilidade
Forma do embasamento	Gerar o volume do embasamento	Transformar dados obtidos nas fases anteriores em uma forma tridimensional e posicionar o volume no local devido
Forma da torre	Gerar o volume da torre	Transformar dados obtidos nas fases anteriores em uma forma tridimensional e posicionar o volume no local devido
Topografia	Criar a superfície topográfica do estudo	Identificar os desenhos importados e transformas as curvas de nível em uma superfície
Relatórios	Gerar informações numéricas sobre o estudo	Identificar os volumes criados pelo algoritmo e com base nos inputs anteriores gerar relatórios de áreas, população e vagas.

Fonte: Autor

5.3.10 Comentários

A finalidade do desenvolvimento da versão 0.2 foi possibilitar o uso do algoritmo para conjuntos de terrenos e com isso permitir as simulações urbanas, sejam elas relacionadas a conforto ou mesmo a população e fluxos de veículos e pessoas. Apesar da meta alcançada, ao longo do desenvolvimento, além da correção de inconsistências verificadas nas versões anteriores, foram identificados itens a serem considerados em próximas versões.

No geral, foi possível verificar dois tipos de problemas, parte deles relacionado à interface Rhinoceros/Grasshopper e parte relacionado ao mecanismo desenvolvido para controle do fluxo do algoritmo para vários terrenos. No primeiro caso as inconsistências podem ser contornadas através de cuidados relativos aos desenhos no *Rhinoceros*. O uso de curvas (polylines) fechadas e a simplificação das figuras, evita que tais figuras sejam decompostas em segmentos muito pequenos, que são a causa principal destes problemas.

No segundo caso, a criação de volumes não é afetada, no entanto, os relatórios podem sofrer modificações indesejadas devido às características funcionais do software utilizado. O controle do fluxo do algoritmo pode levar a duplicidade de cálculos para um mesmo terreno e com isso fazer com que os dados se tornem incorretos. Foram criados mecanismos de detecção para este problema e em versões futuras deve-se trabalhar na confiabilidade dos relatórios.

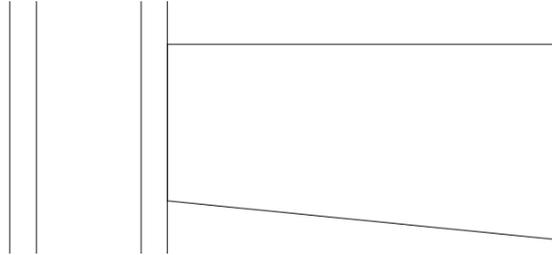
Por fim, destaca-se que a aplicação aleatória dos valores de entrada dos produtos foi utilizada para simular a diversidade de formas existente no espaço urbano. Em futuros estudos, estes valores podem ser definidos através de algoritmos genéticos de forma evolutiva, e com isso, ampliar as possibilidades das simulações.

6. SIMULAÇÕES

6.1 TERRENOS INDIVIDUAIS

Após a construção da versão inicial do algoritmo, foram realizados ensaios utilizando terrenos hipotéticos para demonstrar a utilização da ferramenta. A seguir, será apresentado um destes estudos, considerando um terreno com 12,0m de frente, laterais de 30,0m e fundos de 15,0m, com área de 405m² e localizado em uma rua com 12 m de caixa, conforme a Figura 18 apresentada abaixo.

Figura 18 – Formato do terreno de estudo



Fonte: Autor

Os dados referentes ao produto utilizados para o estudo foram: (a) área computável do térreo, (b) área das unidades, (c) unidades por andar, (d) altura piso a piso, (e) área do núcleo/circulação, (f) vagas por unidade comum, (g) vagas por unidade de cobertura, (g) área equivalente das vagas (Quadro 12).

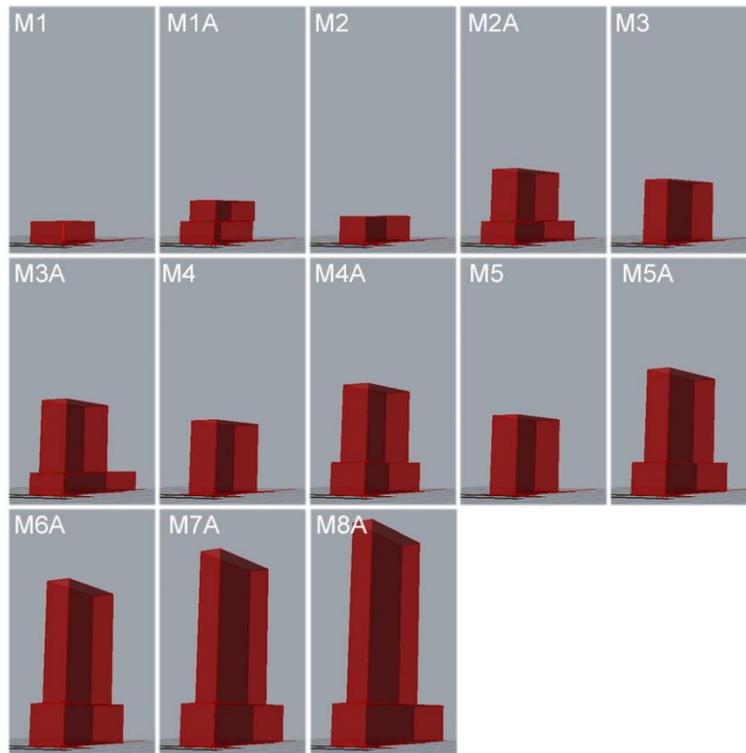
Quadro 12 – Dados do terreno e do produto utilizados para o ensaio

Terreno	Caixa da rua	12 m
	Dimensões do terreno	12,00 x 30,00 x 15,00 x 30,00
	Área do terreno	405,00 m ²
Produto	Área computável do térreo	150 m
	Área das unidades	80 m
	Unidades por andar	2
	Altura piso a piso	3,06 m
	Área do núcleo/circulação	36 m ²
	Vagas por unidade comum	2
	Vagas por unidade de cobertura	3
Área equivalente das vagas	25 m ²	

Fonte: Autor

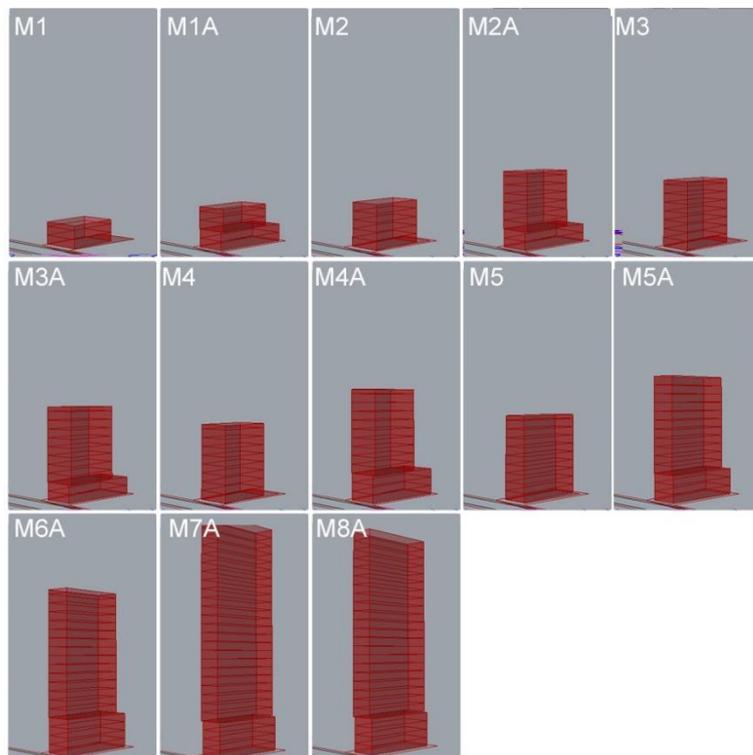
A seguir, são apresentados os resultados do estudo realizado com base no terreno de referência para todos os modelos de ocupação presentes no código de obras de Juiz de Fora. Nas figuras 19, 20 e 21 abaixo, são apresentados os resultados obtidos com as versões 1.0, 1.1 e 1.2 respectivamente.

Figura 19 – Ensaio realizados para diferentes modelos de ocupação – versão 1.0



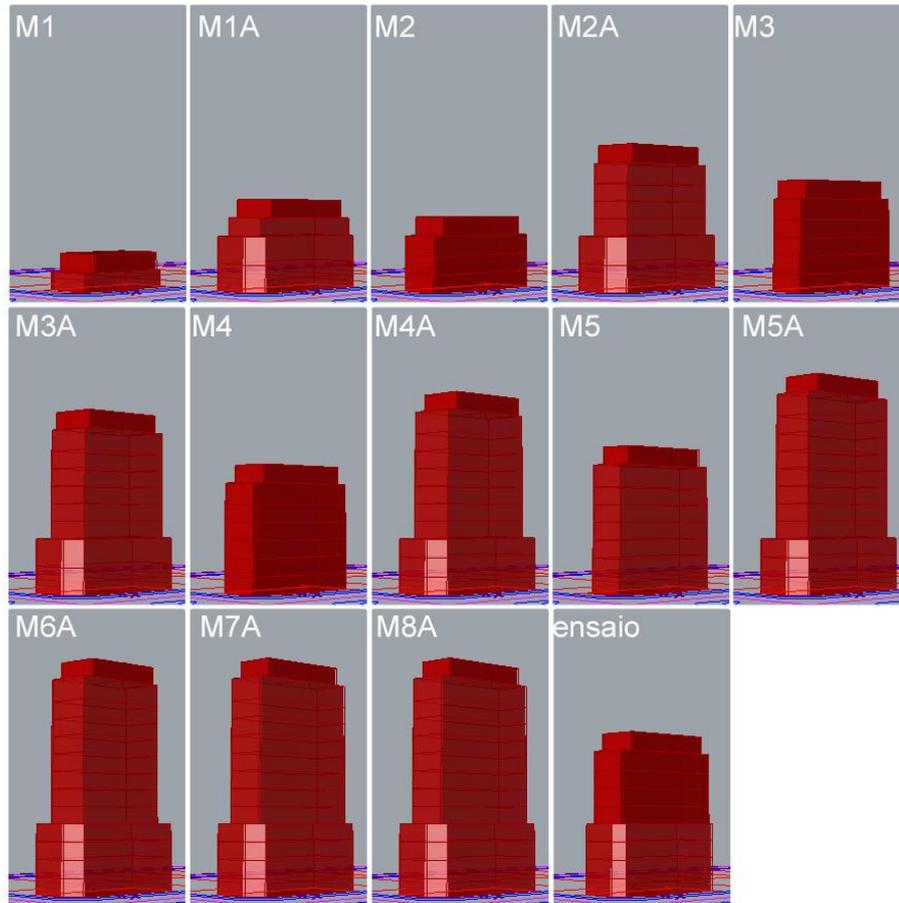
Fonte: Autor

Figura 20 – Ensaio realizados para diferentes modelos de ocupação – versão 1.1



Fonte: Autor

Figura 21 – Ensaio realizados para diferentes modelos de ocupação – versão 1.2



Fonte: Autor

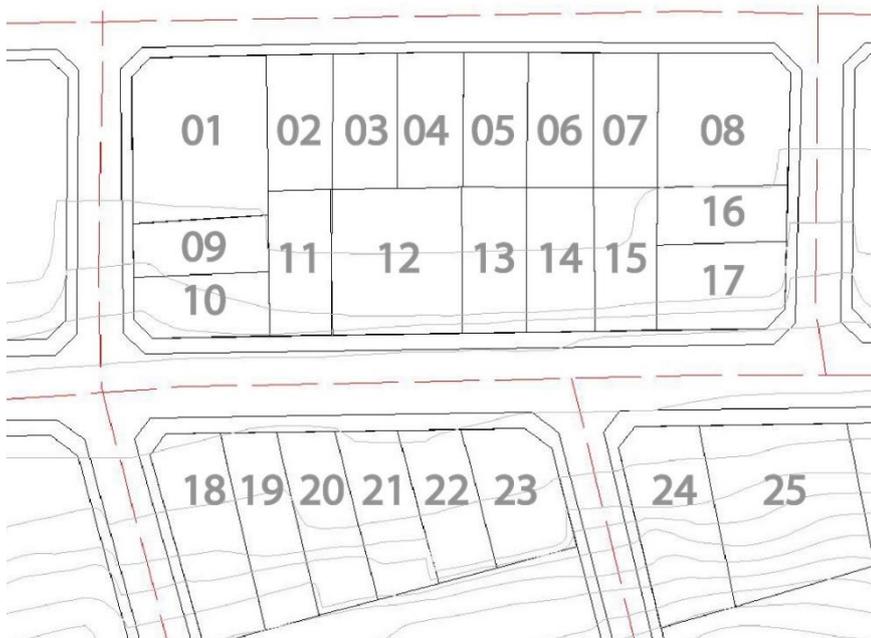
Com a evolução das versões, a busca por maior versatilidade e confiabilidade dos resultados levou a um aumento na complexidade do algoritmo e à necessidade de informações complementares em termos de desenho. Sendo assim, houve a necessidade de adaptação do terreno de referência ainda que mantendo os dados originais do estudo. Nos testes da versão 0.2 foi realizada a simulação de um terreno de esquina, algo que não era possível nas versões anteriores. Além disso, pode-se verificar como a utilização do gabarito para desenvolvimento do modelo leva a uma limitação de ocupação para os modelos menos restritivos.

6.2 CONJUNTOS DE TERRENOS

Ao longo da construção da versão para conjuntos de terrenos, foram realizados ensaios utilizando um recorte do tecido urbano da cidade de Juiz de Fora para testar a utilização do algoritmo. A seleção da área de estudo foi feita tendo em vista a exploração de particularidades que poderiam se apresentar em estudos posteriores, como topografia variada, diferentes

dimensões para ruas transversais e esquinas em ângulos variados. Ainda assim o modelo deveria ser relativamente pequeno para que fosse possível a aferição dos resultados obtidos. A Figura 22, abaixo apresenta a área de testes escolhida.

Figura 22 – área escolhida para testes do algoritmo



Fonte: Autor

Com o algoritmo validado pelos testes anteriores, passou-se ao desenvolvimento de simulações de uma áreas da cidade, as quais são apresentadas a seguir. Para cada uma delas foram desenvolvidos estudos variando os modelos de ocupação presentes no código de obras da cidade. Além disso, com a possibilidade de inserção de valores como ensaio, também foram testados possíveis novos modelos de ocupação a serem propostos.

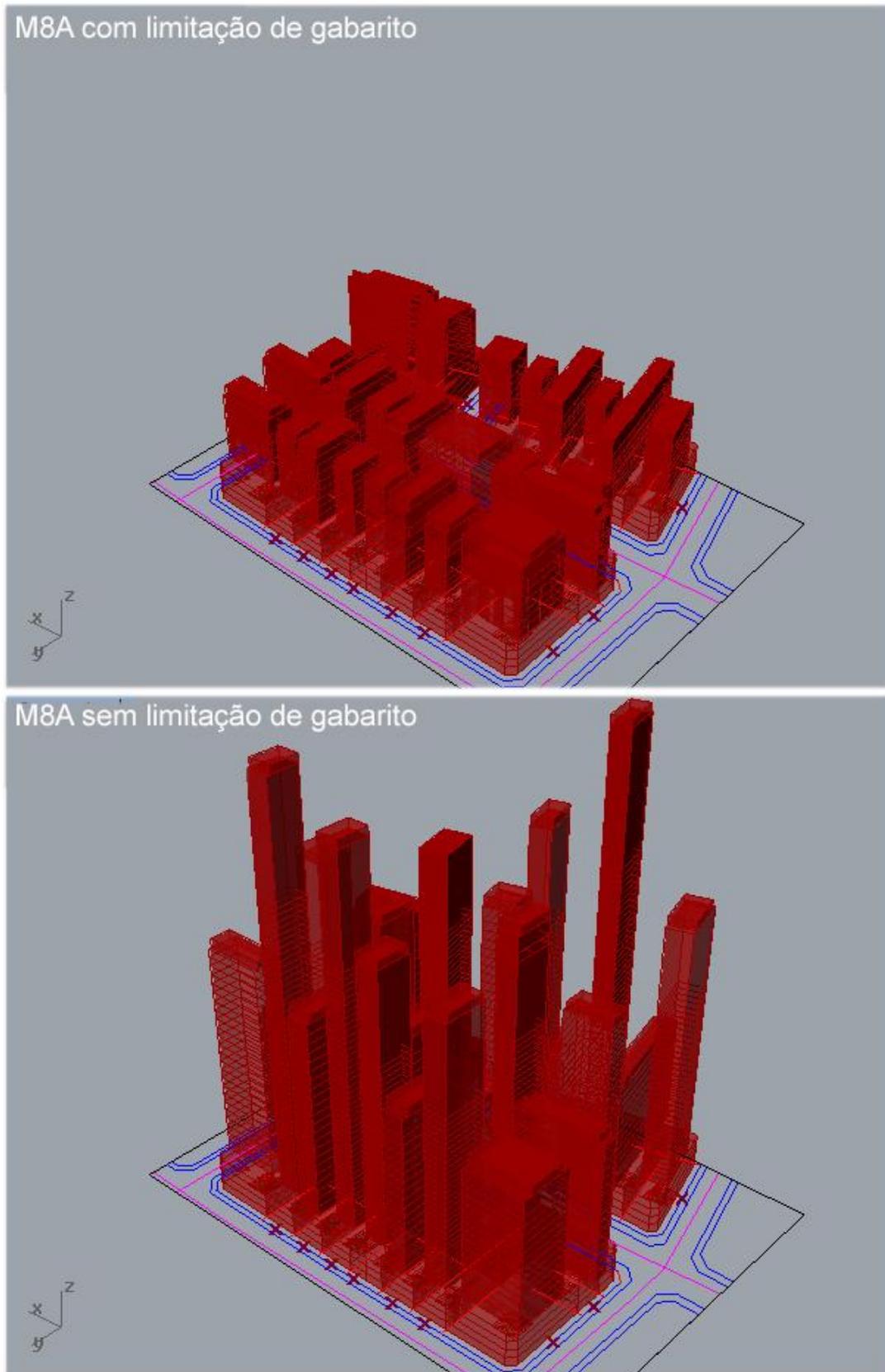
A seguir (FIGURA 23), serão apresentados os resultados de dois testes realizados. Os dados referentes ao produto no caso de múltiplos terrenos são gerados pelo algoritmo de forma aleatória dentro de intervalos definidos pelo usuário. O Quadro 13, a seguir apresenta os valores referentes ao estudo para o modelo de ocupação M8A sem a limitação de gabarito.

Quadro 13 – Dados do estudo para o modelo M8A sem limitação de gabarito

Terreno	Dados do estudo		Valores gerados pelo algoritmo						Relatórios	
	Área terreno	Potencial básico	Núcleo e circulação	Área privativa térreo	Piso a Piso Torre	Un. / andar	Área unidades	Pavimentos	Vagas	População
01	757,22	4921,94	31,49	24,86	2,83	2	56,88	27	43	170
02	305,43	1985,35	34,63	77,11	3,12	1	100,77	18	22	62
03	301,95	1962,69	31,76	29,35	2,86	1	60,65	4	43	69
04	311,02	2021,66	34,90	81,59	3,14	1	104,54	18	22	63
05	297,72	1935,20	32,03	33,83	2,88	1	64,42	29	40	62
06	307,22	1996,92	35,16	86,08	3,16	1	108,30	17	20	62
07	299,73	1948,28	32,30	38,32	2,90	1	68,19	27	37	63
08	600,33	3902,13	35,43	90,56	3,19	2	112,07	16	25	128
09	258,49	1680,21	30,51	8,50	2,75	1	43,14	29	38	57
10	288,12	1872,78	34,72	78,69	3,12	1	102,10	17	20	58
11	315,71	2052,13	30,37	56,26	3,00	1	83,26	23	31	65
12	658,00	4277,00	30,24	4,02	2,72	1	39,38	40	54	151
13	324,92	2112,00	33,10	51,78	2,98	2	79,49	12	15	69
14	339,93	2209,53	35,97	99,53	3,24	1	119,61	17	20	68
15	311,26	2023,21	32,83	47,29	2,96	1	75,72	25	34	65
16	257,96	1676,77	32,57	42,80	2,93	1	71,96	22	29	53
17	376,65	2448,25	35,70	95,04	3,21	1	115,84	19	24	76
18	498,48	3240,16	33,64	60,75	3,02	2	87,02	18	28	106
19	374,38	2433,50	30,78	12,99	2,77	1	46,91	39	54	82
20	368,33	1394,17	33,91	65,23	3,05	2	90,79	12	15	78
21	356,89	2319,80	31,04	17,47	2,79	1	50,68	40	56	77
22	319,03	2073,69	34,18	69,71	3,07	1	94,56	20	26	65
23	374,35	2433,30	31,32	21,96	2,81	1	54,44	29	40	82
24	536,34	3486,22	34,45	74,20	3,10	2	98,33	17	27	114
25	829,71	5393,12	31,59	26,45	2,84	3	58,21	30	55	181

Fonte: Autor

Figura 23 – Comparação de resultados



Fonte: Autor

6.3. APLICAÇÃO PARA SIMULAÇÃO DO ESPAÇO URBANO

Como forma de testar o algoritmo em uma situação real de estudo, foi desenvolvida a simulação de um espaço urbano localizado na cidade de Juiz de Fora com o objetivo principal de desenvolver uma análise das possíveis transformações geradas pela variação dos parâmetros urbanos no local. Buscando aplicar a ferramenta em um ambiente que reúna características comumente encontradas em regiões da cidade, foi importante para a seleção da área, a variedade de (1) desenho de ruas, (2) formas e tamanhos dos terrenos, (3) situações topográficas, (4) usos e (5) ocupação. Com isso, possibilita-se, além da análise do espaço urbano, uma análise da própria ferramenta em condições reais de uso.

6.3.1. Área selecionada

A área selecionada para estudo se caracteriza como uma zona de transição entre a região central da cidade e os bairros residenciais com menor densidade. Os limites foram definidos em função de elementos naturais – Rio Paraibuna e Morro da Glória, e grandes terrenos que marcam a divisão entre bairros – Campo do Sport Club Juiz de Fora e Museu Mariano Procópio.

Figura 24 – área selecionada para simulação



Fonte: Autor

Cortada por vias de trânsito intenso a região conta com boas condições de acesso e pode ser caracterizada como área de passagem. A via férrea se posiciona no limite entre duas situações topográficas distintas, uma região de baixada, relativamente plana que se estende até o rio e uma região em aclive que se estende até o Morro do Imperador, desnível este, que marca a divisão da cidade em suas regiões alta e baixa.

Figura 25 – área selecionada para simulação



Fonte: Autor

O limite representado pela via férrea também define duas regiões de usos distintos. A região mais baixa se caracteriza, em sua maior parte, pelos galpões de uso comercial. São também consideráveis, nesta área, os terrenos voltados para uso institucional, com um campo de futebol e áreas das forças armadas e do estado de Minas Gerais. A região em aclive, por sua vez apresenta uso predominantemente residencial. A mesma divisão também pode ser percebida em termos de parcelamento do solo enquanto na região baixa se verifica um menor número de terrenos com dimensões maiores, na região alta são encontrados terrenos com menores dimensões porem em maior número.

Figura 26 – área selecionada para simulação – modelos de ocupação



Fonte: Autor

A região apresenta quase todos os terrenos ocupados, mas ainda não é explorada até seu potencial máximo. Em termos legais, a região apresenta 4 Zonas de Uso e Ocupação que vão da mais restritiva ZR2 até a mais permissiva ZUM. Neste cenário legal são permitidos até 11 Modelos de Ocupação diferentes o Quadro 14 abaixo apresenta os principais parâmetros para cada um deles.

Quadro 14 – Modelos de ocupação

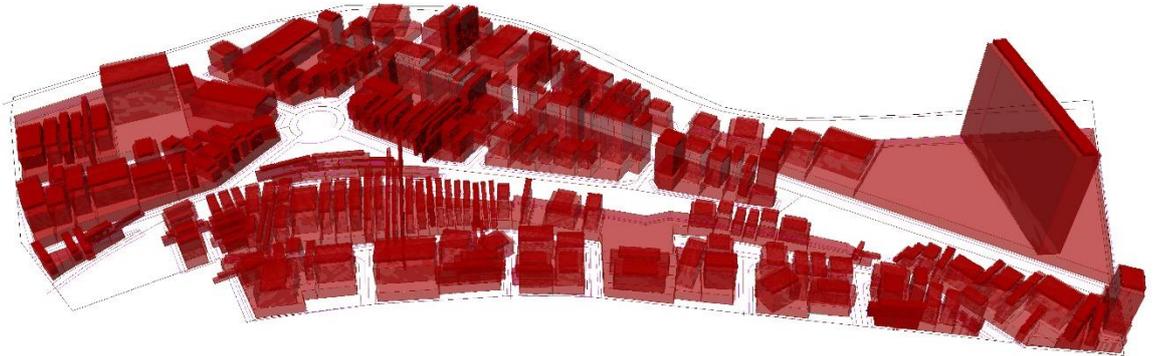
Modelo	Coefficiente de aproveitamento	Taxa de ocupação	Afast. frontal	Afastamento lateral e fundos
M1	1,0	65%	3	-
M2	1,3 ou 1,7*			Lote > 300m ²
M3	1,8 ou 2,4*			Uma divisa = 0 Demais = 1,5
M4	2,5 ou 2,8*	50%	3	Uma divisa = 0 Demais = 1,5
M5	3,0			Testada > 12m = 1,5
M1A	1,0			2,0
M2A	1,65 ou 2,1*	1º ao 3º pav. = 100% Demais: 65%	2	1º ao 3º pav. = 0
M3A	2,2 ou 2,8*			Demais pav.: Uma divisa = 0 Demais = 1,5
M4A	3,0			1º ao 3º pav. = 100% Demais: 50%
M5A	3,5	1º ao 3º pav. = 100% Demais: 50%	2	1º ao 3º pav. = 0
M6A	4,5			Demais pav. Testada ≤ 12m: Uma divisa = 0 Demais = 1,5
				Demais pav. Testada > 12m = 1,5
				1º ao 3º pav. = 0
				Demais: 2
				1º ao 4º pav. = 0
				Demais: 2

* valores permitidos para casos específicos em função do número de vagas

Fonte: http://www.jflegis.pjf.mg.gov.br/c_norma.php?chave=0000037014, adaptado pelo autor

A Figura 27 abaixo apresenta a situação local com uma possibilidade de configuração para o aproveitamento máximo do potencial construtivo da região. Os parâmetros da legislação permitem potenciais construtivos que variam de 1.0, nas áreas residenciais, até 4.5 nas vias principais. Com uma área total disponível de aproximadamente 155.600m², o potencial total da área poderia ultrapassar 540.000m²

Figura 27 – área selecionada situação atual com ocupação máxima

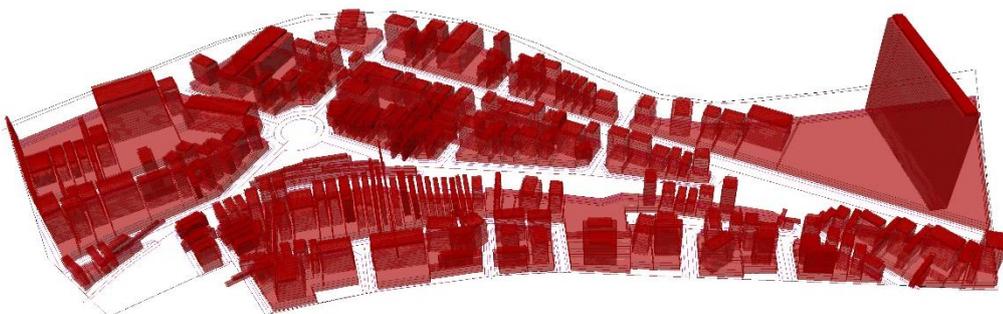


Fonte: Autor

6.3.2. Simulações

Para uma primeira simulação se adotou o modelo M4A para toda a área, tal mudança implicaria na redução do potencial para determinadas áreas e em um aumento considerável para outras. Neste caso, (Figura 28), considerando os mesmos 155.600m², com um coeficiente de aproveitamento de 3.0, o potencial total da área seria reduzido para 465.000m².

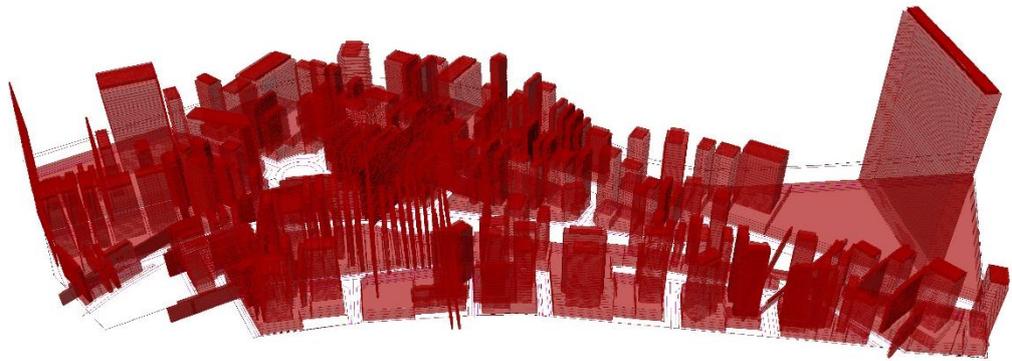
Figura 28 – área selecionada simulação 01 – modelo de ocupação M4A



Fonte: Autor

Para a segunda simulação se adotou o modelo M8A para toda a área, desta forma se simula o modelo máximo permitido pela legislação atual. Com o coeficiente de aproveitamento de 6.5, o potencial total da área alcançaria mais de 1.000.000m² (Figura 29).

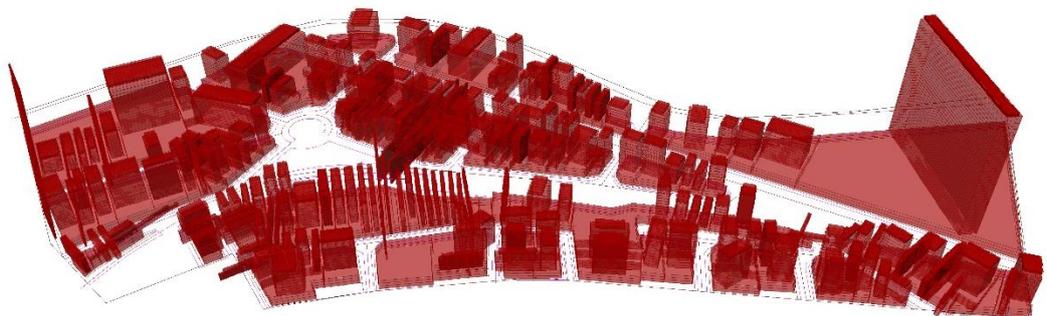
Figura 29 – área selecionada simulação 01 – modelo de ocupação M5A opção 01



Fonte: Autor

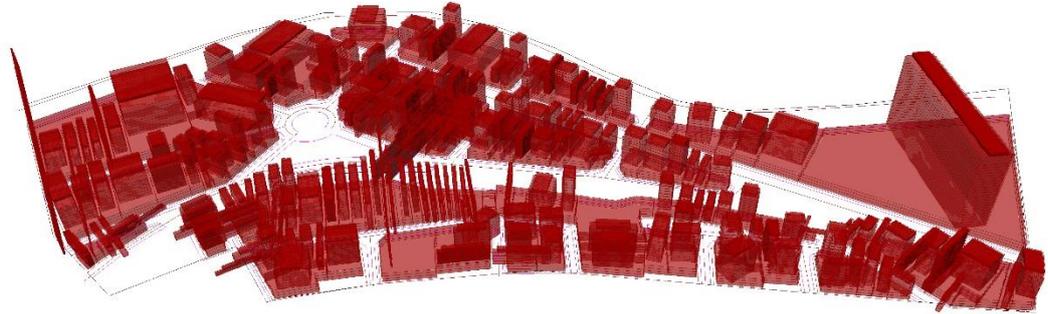
Vale ressaltar que não há um limite claro para o número de simulações possíveis para cada modelo de ocupação. A seguir são apresentadas duas possíveis situações para o modelo de ocupação M5A. Tais diferenças foram possíveis visto que o algoritmo pode gerar aleatoriamente valores específicos para os parâmetros de produto a serem adotados no estudo (Figura 30 e Figura 31).

Figura 30 – área selecionada simulação 03 – modelo de ocupação M5A – opção 01



Fonte: Autor

Figura 31 – área selecionada simulação 04 – modelo de ocupação M5A – opção 02



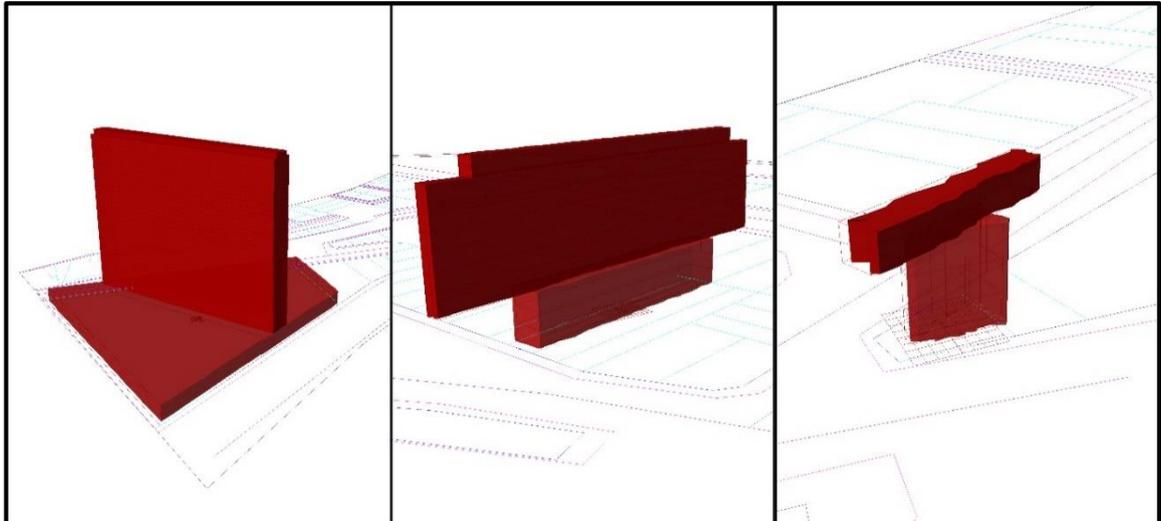
Fonte: Autor

6.3.3. Considerações sobre o uso do algoritmo

Com o uso do algoritmo em uma situação real foi possível identificar alguns pontos fortes e fracos do sistema. Destaca-se como ponto positivo a velocidade de simulação, os volumes tridimensionais são criados praticamente de forma instantânea para cada terreno em sequência. A possibilidade de simular o ambiente em etapas, com diferentes modelos de ocupação para setores diferentes da área também se mostrou interessante, a medida em que permite maior liberdade para os estudos.

Por sua vez, devem ser destacadas como pontos negativos, algumas inconsistências dos volumes gerados (Figura 32). Terrenos que não suportam o modelo simulado retornam volumes incorretos, por vezes extrapolando os limites do terreno. Tais situações já haviam sido verificadas ao longo do desenvolvimento do algoritmo e solucionadas para a maior parte dos casos, no entanto, para esta simulação surgiram problemas para terrenos específicos.

Figura 32 – área selecionada simulação 01 – inconsistências



Fonte: Autor

De acordo com a análise dos objetos gerados incorretamente e de sua relação com o ambiente, foi possível verificar que tais erros surgem, principalmente, da relação entre tamanho do terreno e os modelos de ocupação muito permissivos, como exemplo, em uma área de aproximadamente 100m² o algoritmo gerou um estudo de massa incorreto para o modelo de ocupação M8A. Outras questões a serem analisadas são relacionadas as formas irregulares e principalmente a terrenos com testadas muito pequenas. Por fim, para simular de forma mais adequada situações reais, indica-se a criação de mecanismos que permitam a divisão da área a ser construída em mais de uma torre por terreno. Para a versão atual do algoritmo, por questões de redução de complexidade, esta possibilidade não foi considerada.

7. ANÁLISE

Com base na pesquisa aqui relatada, a seguir será apresentada uma análise do processo de desenvolvimento do algoritmo com ênfase em cinco temas distintos: (1) ambiente legal, (2) produto, (3) processo de criação do algoritmo, (4) usabilidade e (5) limitações.

No que diz respeito ao (1) ambiente legal, a adequação dos projetos à legislação depende da busca de informações e comparação com uma série de tabelas de referência, além de cálculos específicos para cada situação. O algoritmo desenvolvido consegue automatizar parte destas operações, tornando o processo de teste de hipóteses de projeto praticamente instantâneo, dependendo apenas da mudança nos valores de entrada. Desta forma, a partir do

reconhecimento das restrições de projeto e de uma abordagem sistematizada de solução de problemas, pode-se, através de um algoritmo de projeto, caminhar em direção ao que Kilkelly (2015a e 2015b) defende, que a ação criativa permaneça nas mãos do arquiteto, mas que a parte repetitiva seja automatizada, “eliminando o trabalho tedioso e de baixo valor no nosso dia-a-dia”.

Como visto anteriormente, os parâmetros apresentados no código de obras podem ser classificados de acordo com seu impacto na forma arquitetônica. Para este algoritmo foram abordados os geradores de forma – aqueles que definem a área a ser construída –, os limitadores da forma – limites do espaço máximo para a forma a ser gerada – e os extras – permissões legais além da área construída máxima. Tais parâmetros se mostraram aplicáveis de forma direta no algoritmo, a sequência das decisões que compõem os estudos pode ser feita de forma linear, tornando o processo relativamente simples em termos de organização.

No que diz respeito às restrições – limitadores que interferem no volume virtual máximo do edifício –, devido à natureza destes parâmetros, tais como medidas mínimas, área e diâmetros de ventilação, entre outros, dependem de uma predefinição de ambientes em planta que traria uma complexidade muito maior para o processo. Este tema tem sido, inclusive, explorado individualmente ao longo das últimas décadas, destacam-se entre eles, os relacionados à Gramática da Forma, Autômatos Celulares e Fractais, entre outros.

Outro uso relacionado ao ambiente legal, seria a aprovação de projetos. O algoritmo, em sua versão atual, gera uma possibilidade de volume máximo para a ocupação do edifício a partir da adoção de valores específicos para os inputs, sendo assim, ele não se mostra adequado à checagem legal, visto que qualquer variação nos valores adotados pode gerar volumes completamente diferentes. Neste caso, seria necessária uma mudança no foco da produção do algoritmo, passando da geração de formas para o reconhecimento de formas e comparação com os parâmetros legais.

Ao tratar do (2) produto em si, faz-se necessária uma análise distinta para o uso do algoritmo para o projeto arquitetônico – estudo realizado para um único terreno –, e para o projeto urbano – estudo realizado para vários terrenos –. Em termos práticos, a diferença entre os dois universos é a entrada de dados, para o estudo individualizado o usuário pode inserir os valores dos inputs diretamente, desta forma, se possibilita o teste de hipóteses de projeto instantaneamente. Ao se escolher o número de unidades por andar, a área das unidades ou mesmo a área privativa no térreo (em geral utilizada para lojas), o reflexo destas mudanças no volume tridimensional produzido pode ser verificada em tempo real. Em termos de valores alcançados pelo algoritmo, estes foram semelhantes aos alcançados através do método

convencional, tal fato pode demonstrar que o desenvolvimento de ferramentas de automação de cálculos e adequação à legislação pode contribuir para melhorar a eficiência na tomada de decisões ao longo do processo de projeto.

No caso do projeto urbano, devido ao fato de se gerar os estudos de massa para diversos terrenos, não existe a possibilidade de entrada de dados individualmente, os inputs são gerados, para cada terreno, pelo próprio algoritmo dentro de intervalos gerais definidos pelo usuário. Neste caso, o objetivo é gerar um possível cenário de ocupação para uma área da cidade, possibilitando a verificação do impacto de decisões referentes aos parâmetros urbanos, sejam elas alterações de modelos de ocupação permitidos ou mesmo ensaios para a criação de novos modelos de ocupação. O uso do algoritmo neste caso pode ser direcionado à simulações em conjunto com as funcionalidades oferecidas pelos softwares atuais. Com os volumes tridimensionais gerados, podem ser feitas análises de conforto térmico centradas, por exemplo, em insolação e ventilação. Por fim, com os relatórios gerados pelo algoritmo, pode-se simular também cenários de população, fluxos e infraestrutura.

O (3) processo de criação do algoritmo requer a aplicação de conhecimentos e forma de pensar distintos, aliando capacidades técnicas em arquitetura, urbanismo e programação. Para Kilkelly (2015b), “arquitetos são notórios pensadores com o lado direito do cérebro” centrados na solução de problemas de forma criativa e subjetiva, no entanto, alguns problemas requerem uma abordagem rigorosa e objetiva. Neste ponto, se verificou a principal dificuldade para o desenvolvimento do algoritmo, a tradução de um problema, em geral, tratado de forma aberta, em uma sequência finita de processamentos que transformam diversos inputs em uma única saída, um volume tridimensional.

Além da natureza subjetiva do problema, a própria mecânica de programação do algoritmo requer um desenvolvimento específico, visto que, apesar do computador ser parte importante do processo de projeto, o ensino de computação nos cursos de arquitetura está voltado para uso de ferramentas e não para sua programação. Sendo assim, para se conseguir produzir um algoritmo de projeto, há a necessidade, não só de uma abordagem conceitualmente diferente do problema, mas também, da capacitação técnica para a programação, é necessário, além de usa-las, aprender a programar e editar as próprias ferramentas.

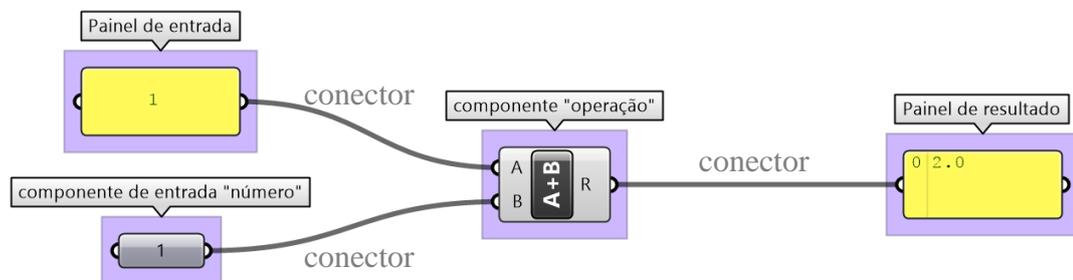
Se o arquiteto, ainda que de forma superficial, precisa se qualificar como programador, pode ser ainda mais complexo o processo de aprendizado necessário para que um programador consiga compreender o processo de projeto, seja arquitetônico ou urbano. No caso da produção de estudos de massa, apesar da sequência de ações poder ser identificada facilmente, existem tomadas de decisão ao longo do processo, em geral baseadas em opções subjetivas, que tornam

a automatização total inviável para a criação de um objeto arquitetônico específico. Sem uma ação fundamentada para as decisões de projeto, qualquer solução passa a ser possível e o número de resultados gerados pode ser infinito.

Neste ponto pode-se explorar os algoritmos genéticos capazes de aprender ao longo do tempo e encontrar a solução mais adequada para o problema. No estado atual do algoritmo foram identificados como possíveis parâmetros chave para este tipo de ação, os inputs de produto, assim, ao se definir tais parâmetros de forma evolutiva pode-se chegar a uma única solução, mais adaptada aos pré-requisitos escolhidos. Neste caso, a definição dos itens a serem levados em conta para a escolha do objeto mais adaptado requerem conhecimento técnico na área de projeto que.

Usabilidade (4), está relacionada à otimização das interações entre pessoas e produtos para que estes sejam agradáveis, efetivos de se usar e fáceis de se aprender da perspectiva do usuário Preece et al. (2011:26). No caso do algoritmo em questão, ainda que este seja um produto de acesso qualificado, para o qual seus usuários necessitam de conhecimentos prévios dos softwares utilizados, foram realizadas ações voltadas para a facilitação da interação usuário/produto.

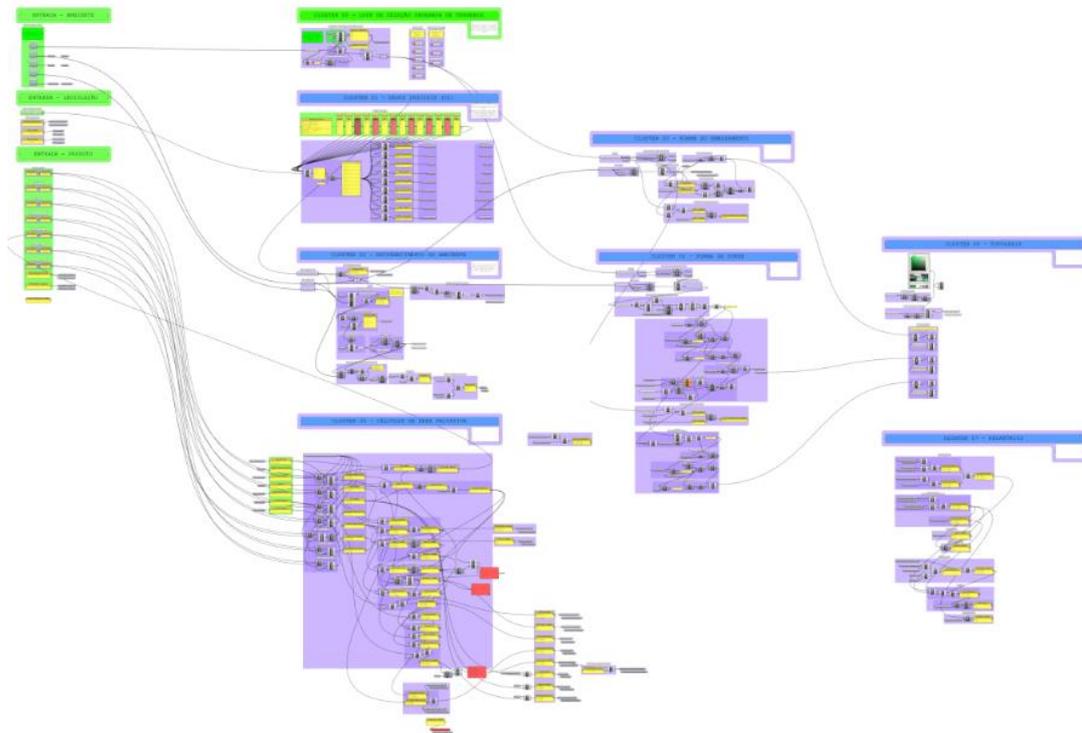
Figura 33 – Componentes e conectores



Fonte: Autor

Como visto anteriormente, o Grasshopper é um software de programação baseado em linguagem visual, sua interface se utiliza de componentes e conectores para compor o algoritmo de projeto (Figura 33). O resultado final da programação é uma “área de trabalho” preenchida por um grande número destas entidades (Figura 34), sendo que todas elas são ativas no processo e, qualquer modificação no algoritmo interfere em seu resultado final, podendo inclusive impedir a geração de formas. Sendo assim, foi necessário criar formas de organização que possibilitassem a entrada de dados e ainda assim evitassem a modificações indesejáveis por parte dos usuários.

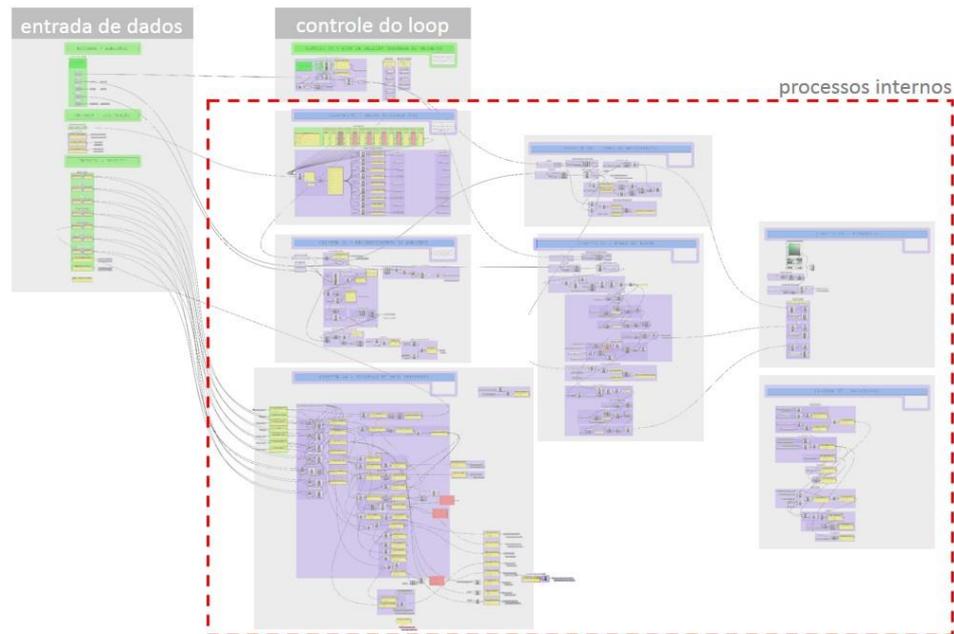
Figura 34 – Área de trabalho completa do algoritmo de projeto



Fonte: Autor

A programação do algoritmo se baseou na divisão das ações em grupos dedicados, cada um deles responsável por um tipo de processamento. Com base nesta organização, a disposição dos comandos na área de trabalho procurou utilizar a mesma lógica, cada grupo foi posicionado em função da necessidade de interação com o usuário e foram utilizadas cores para diferenciar entradas de dados em processos internos (Figura 35). Os comandos (A) Entrada de Dados, e (B) Seleção Ordenada de Terrenos – controle do loop, são os únicos com a necessidade de interação direta dos usuários e, por este fato, foram posicionados na parte inicial, superior esquerda, da área de trabalho e receberam a cor verde. Os demais, grupos, (C) Dados Iniciais, (D) Reconhecimento do Ambiente, (E) Forma do embasamento, (F) Cálculos da Área Privativa, (G) Forma da Torre, (H) Topografia e (I) Relatórios, não devem possibilitar tal interação e, por isso, foram dispostos na parte final do algoritmo e receberam a cor azul. Como dito na descrição do desenvolvimento do algoritmo, todos os grupos podem ser transformados em *clusters*, e assim, a interação do usuário seria melhor controlada. No entanto, nesta fase de estudos, é importante que os processos permaneçam abertos a fim de possibilitar a verificação de cada um dos comandos.

Figura 35 – Organização da área de trabalho do algoritmo de projeto



Fonte: Autor

A partir do exposto acima, pode-se afirmar que ao longo da programação do algoritmo foram necessárias opções por soluções específicas que levaram a limitações (5) tanto para o desenvolvimento do algoritmo quanto para seu uso. Em geral, estas limitações se devem à necessidade de redução no número de interações usuário/algoritmo, na capacidade de identificar qualquer tipo de terreno e na geração de estudos de massa da forma menos complexa e mais direta possível.

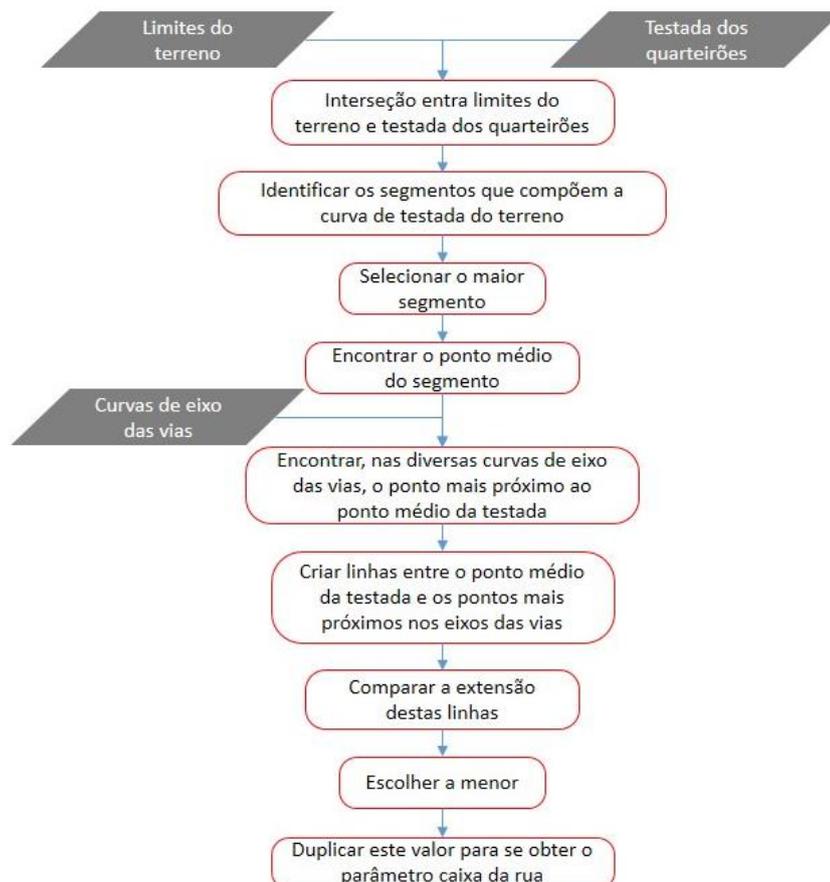
O reconhecimento do ambiente precisa ser capaz de identificar terrenos com qualquer forma, por isso, foi necessário criar mecanismos que pudessem identificar diversos valores para um parâmetro e selecionar um destes valores de forma qualificada. Como exemplo, vale citar a identificação do valor da “caixa da rua”, que posteriormente é usado para a definição do gabarito máximo permitido. O processo se inicia com a interseção dos limites do terreno com a curva de testada dos diversos quarteirões para gerar a testada do terreno, a seguir, identificam-se os segmentos que compõem a curva de testada do terreno, seleciona-se o maior segmento, encontra-se o ponto médio deste segmento, encontra-se, nas diversas curvas de eixo das vias, o ponto mais próximo ao ponto médio da testada, criam-se linhas entre estes pontos e os pontos médios da testada, compara-se a extensão destas linhas, escolhe-se a menor delas e, por fim, duplica-se este valor para se obter o parâmetro “caixa da rua” específico para cada terreno (Figura 36). Como se vê, a necessidade de versatilidade aumenta a complexidade do processo

de geração de formas, cada ação realizada precisa levar em conta um cenário amplo de possibilidades, ser capaz de identificar variáveis e definir a mais adequada.

Outro reflexo da necessidade de reconhecimento de diversos terrenos, é que em algum momento os valores gerados podem ser nulos. Neste caso, o algoritmo precisa contar com mecanismos de controle de dados incorretos, tais mecanismos utilizam testes de dados em vários pontos do processo para identificar valores nulos e substituí-los por valores válidos obtidos com base nos mesmos métodos de cálculo.

Por fim, no que diz respeito ao uso, as principais limitações geradas pela forma escolhida para a programação do algoritmo estão relacionadas aos conhecimentos básicos dos softwares utilizados e da legislação, visto que, com a organização da área de trabalho apresentada acima, acredita-se que não haja dificuldades na identificação das entradas e processamentos. No entanto, a qualidade dos desenhos no Rhinoceros e o próprio controle de inconsistências verificadas ao longo do processo precisam ser preocupações do usuário.

Figura 36 – Fluxograma da definição da caixa da rua



Fonte: Autor

8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Como visto anteriormente, Castells (2010) afirma que vivemos um momento de revolução não centrada apenas no conhecimento em si, mas em sua aplicação para gerar conhecimento e dispositivos de processamento/comunicação, completando um loop cumulativo entre inovação e uso de tais inovações. Sendo assim, parametrização, sistemas generativos, projetos algorítmicos e algoritmos genéticos podem ser considerados o reflexo desta revolução no campo da arquitetura. Neste contexto, o desenvolvimento de um algoritmo de projeto bem como sua análise se mostra como uma forma de exploração prática das possibilidades de integração dos processos humanos aos digitais.

A reação inicial ao produto da pesquisa se mostra semelhante ao que se experimenta ao verificar a adoção da tecnologia digital nos demais campos do conhecimento, liberdade de experimentação, praticidade e velocidade emergem como atributos principais para a ferramenta desenvolvida. Verificar o surgimento de uma torre residencial ou comercial de forma instantânea e ter a capacidade de modifica-la apenas com a mudança de valores para os parâmetros de entrada. Presenciar o surgimento de um espaço urbano simulado pela máquina e materializar tridimensionalmente estudos para instrumentos de controle do espaço urbano, a princípio impalpáveis, como taxa de ocupação e coeficiente de aproveitamento entre outros, trazem para o campo de atuação do arquiteto possibilidades diversas no que diz respeito à métodos, meios e processos de projeto.

Em geral, verifica-se nos projetos emblemáticos que utilizam a parametrização, que este tipo de método se mostra bastante direcionado à exploração formal ou estrutural de geometrias complexas. Neste tipo de projeto, as regras são criadas de forma livre pelo próprio projetista em função de suas opções de projeto. Criação de figuras geométricas específicas, mapeamento, distribuição, posicionamento e movimentação de objetos, bem como transformações em elementos tridimensionais são mecanismos usados para gerar o objeto arquitetônico. Com isso, por ter o controle das restrições o projetista pode definir concessões que tornam o processo de programação menos complexo se comparado às restrições legais.

Os parâmetros de legislação em geral se utilizam de conceitos simples, sejam eles algébricos ou geométricos. Para a geração de área construída e suas limitações são usados apenas as operações fundamentais, no que diz respeito ao controle da forma gerada, as operações geométricas também são bastante simples, como distância entre retas paralelas e interseção de figuras bidimensionais, no entanto, o que dificulta o processo é a sequência de operações e a necessidade de adaptação à todos os cenários possíveis. Com isso, conseguir

simular uma série de operações simples realizadas em cadeia, baseadas em várias decisões de projeto tomadas ao longo do processo e ser capaz de se adaptar a qualquer ambiente possível, torna o processo de geração de formas a partir da adequação à legislação algo complexo por si só, e desenvolver o algoritmo para realizar tais ações eleva ainda mais esta complexidade.

A partir deste estudo, podemos supor que, além da experimentação formal, o uso de parametrização com base em normas legais e regulamentos pode trazer benefícios para o processo de projeto, uma vez que a produção e teste de soluções diversas pode ser acelerada. Além disso, em termos de gestão, a possibilidade de documentar as soluções de projeto que surgem ao longo do processo podem contribuir para o desenvolvimento do projeto, uma vez que a interoperabilidade e a melhor coordenação dos complementares são cada vez mais necessários a partir da adoção dos sistemas BIM.

A possibilidade de inserir decisões técnicas no início do processo de projeto é uma grande vantagem deste tipo de ferramenta, uma vez que dá maior clareza ao projetista quanto às restrições que, em algum momento, deverão ser aplicadas ao objeto arquitetônico.

Em contrapartida, uma fraqueza das ferramentas de parametrização em comparação com o método convencional não está em sua utilização, mas sim no seu desenvolvimento. É necessária uma extensa análise de leis e normas, bem como um conhecimento avançado dos softwares de cálculo e parametrização. Este fato pode demonstrar a importância da especialização do arquiteto como projetista em conjunto com o conhecimento em lógicas de programação.

Como exposto anteriormente, para o cálculo de vários terrenos os valores de produto são simulados pelo algoritmo dentro de intervalos informados pelo usuário, tais valores podem surgir de intuições ou experiências pessoais, ou mesmo, de dados oficiais, como, por exemplo, população sugerida pelas normas técnicas do corpo de bombeiros. Sendo assim, no que diz respeito a seu uso, verifica-se a necessidade da adaptação dos agentes do processo aos requisitos dessas novas ferramentas, são necessário tanto conhecimento técnicos quanto a ampliação do número de plataformas a serem usadas no projeto, como Windows Excel ou Grasshopper, além das usuais AutoCAD e SketchUp.

Em termos de programação, as VPL se mostram adequadas para uma experimentação inicial, visto que sua utilização é bastante simples e direta, mesmo para usuários sem conhecimentos prévios. No entanto, a medida em que os problemas a serem abordados se tornam mais complexos, surgem necessidades para as quais, este tipo de programação pode não ser a mais adequada. Com isso, se indica a utilização de linguagens baseadas em texto, mesmo que para tal, seja necessária uma maior especialização dos criadores das ferramentas.

As soluções de projeto em geral são complexas e levam em consideração variáveis ambientais, legais e cognitivas, o que faz com que a automatização total seja muito mais complexa do que a simples parametrização pode alcançar, sendo assim, como ferramenta de projeto foco principal seria a automatização das ações repetitivas, se caracterizando como um suporte às decisões, não um substituto ao projetista. De certa forma, inteligência artificial e sistemas generativos baseados em algoritmos genéticos podem ser uma resposta para este problema, no entanto, ainda assim, a automatização completa se mostra um tarefa bastante complexa.

Por outro lado, destaca-se o potencial integrador da ferramenta no que diz respeito às disciplinas complementares ao projeto arquitetônico ou urbano. Os relatórios a serem gerados pelo algoritmo podem ser utilizados para dimensionamento das demandas de energia elétrica hidráulica e, principalmente, para simulações relacionadas ao conforto térmico e lumínico, levando em consideração insolação e ventilação, por exemplo.

Por fim, entre outros temas a serem explorados posteriormente destacam-se, o potencial educacional do desenvolvimento de algoritmos baseados em requisitos legais ou outras restrições de projeto específicas, o uso do algoritmo como suporte ao projeto arquitetônico e urbano, bem como, quais seriam as mudanças necessárias para tornar sua utilização viável para arquitetos e urbanistas.

REFERENCIAS

- ABRISHAMI, S. et al. **Integration of BIM and generative design to exploit AEC conceptual design innovation.** Journal of Information Technology in Construction (ITcon) 19: 350-359, 2014.
- AIEN A. et al. **Integrating Legal and Physical Dimensions of Urban Environments - ISPRS International Journal of Geo-Information**, 2015.
- ALMEIDA, M. **Curso essencial de lógica de programação.** São Paulo: Digerati Books, 2008.
- ANDRADE, M. L. V. X.; RUSCHEL, R. C. Building Information Modeling (BIM). In: KOWALTOWSKI, D. C. C. K. et al. **O Processo de Projeto Em Arquitetura da Teoria à Tecnologia.** São Paulo: Oficina de Textos, 2011.
- ANDRADE, M. L. V. X. et al. O Processo e os Métodos. In: KOWALTOWSKI, D. C. C. K. et al. **O Processo de Projeto Em Arquitetura da Teoria à Tecnologia.** São Paulo: Oficina de Textos. 2011.
- AYRES FILHO, C. **Acesso ao modelo integrado do edifício.** Pós-Graduação em Construção Civil - Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2009. Dissertação de Mestrado.
- AZHAR, S. Building Information Modeling (BIM) Trends, Benefits, Risks, and Challenges for the AEC Industry. **Leadership and Management in Engineering**, v. 11, n. 3, 2011. p. 241–252.
- BENEVOLO, L. **História da arquitetura moderna.** São Paulo: Perspectiva, 4^a ed., 2006.
- BENEVOLO, L. **La cattura dell'infinito.** Editori Laterza: Bari 1991.
- BIRX, G. W. **Getting started with Building Information Modeling.** The American Institute of Architect – Best Practices, 2006. Acesso em 13 set 2016: <http://www.aia.org/aiaucmp/groups/secure/documents/pdf/aiap016608.pdf>
- BUDGEN, D.; BRERETON, P.; KITCHENHAM, B. A. **Evidence-Based Software Engineering and Systematic Reviews.** Boca Raton: CRC Press, 2016.
- CASTELLS, M. **The Rise of the Network Society: The Information Age: Economy, Society, and Culture.** Hoboken: Wiley-Blackwell, 2a. ed., 2010.
- CARDOSO, C. F. **100 anos de verticalização em Juiz de Fora: edifícios de apartamentos na avenida Barão do Rio Branco.** Juiz de Fora: UFJF, 2015. Dissertação de Mestrado.
- CELANI, G. 2011. Algorithmic Sustainable Design: Uma visão crítica do projeto generativo. **Resenhas Online**, n. 116, 2011. Acesso em 10 ago 2016: <http://www.vitruvius.com.br/revistas/read/resenhasonline/10.116/3995>

CHASE, S.C. Generative design tools for novice designers: Issues for selection. **Automation in Construction**, v. 14, n. 6, 2005. p. 689–698.

CHARDON, S.; BRANGEON, B.; BOZONNET, E.; INARD, C. Construction cost and energy performance of single family houses: From integrated design to automated optimization. **Automation in Construction**, v. 70, 2016. p. 1–13.

CHOAY, F. **O Urbanismo**. São Paulo: Perspectiva, 2005.

COOK, D. Systematic reviews: the case for rigorous methods and rigorous reporting. **Canadian Journal of Anaesthesia/Journal Canadien D'Anesthesie**, v. 44, n. 4, 1997. p. 350-3.

EASTMAN, C. M. et al. **BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers and Contractors**. Hoboken: Wiley-Blackwell, 2008.

EASTMAN, C. M. The use of computers instead of drawings in building design. **AIA Journal**, v. 63, n. 3, 1975. p. 46-50.

FAGHIHI, V. et al. Automation in construction scheduling: a review of the literature. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 81, n. 9, 2015. p. 1845–1856.

FISCHER, T.; HERR, C. M.. **Teaching generative design**. Proceedings of the 4th International Generative Art Conference. Milan: Politecnico di Milano University, 2001.

FLORIO, W. **Contribuições do Building Information Modeling no processo de projeto em arquitetura**. Anais do III Encontro de Tecnologia de Informação e Comunicação na Construção Civil. Porto Alegre: Antac, 2007.

FUNDAÇÃO JOÃO PINHEIRO. **Déficit habitacional no Brasil 2011-2012**. Belo Horizonte: Fundação João Pinheiro, 2015. Programa distribuído online.

GU, N.; LONDON, K.; Understanding and facilitating BIM adoption in the AEC industry. **Automation in Construction**, v. 19, n. 8, 2010. p. 988–999.

HENRIQUES, G. C.; BUENO, E. **Geometrias Complexas e Desenho Paramétrico**. Drops 030.08, 2010. Acesso em 28 jan 2016: <http://www.vitruvius.com.br/revistas/read/drops/10.030/2109>.

HERNANDEZ, C. R. B. Thinking parametric design: introducing parametric Gaudi. **Design Studies**, v. 27, n. 3, 2006. p. 309–324.

HIGGINS, J.P.T.; GREEN, S. (ed.). **Cochrane Handbook for Systematic Reviews of Interventions Version 5.1.0**. The Cochrane Collaboration, 2011. Acesso em 05 fev 2016: <http://www.handbook.cochrane.org>.

HOWELL, I.; BATCHELER, B. **Building information modeling two years later — Huge potential, some success, and several limitations**. The Laiserin Letter 24, 2005. Acesso em 29 jan 2016: http://www.laiserin.com/features/bim/newforma_bim.pdf

IBGE. **Cidades – Juiz de Fora**. 2015. Acesso em 21 fev 2016: <http://cod.ibge.gov.br/7PF>

ISSA, R. R. A.; SUERMANN, P. C.; OLBINA, S. **Use of building information models in simulations**. Proceedings of the 2009 Winter Simulation Conference. Austin: WSC, 2009.

KALAY, Y. E. Redefining the role of computers in architecture: from drafting/modelling tools to knowledge-based design assistants. **Computer-Aided Design**, v. 17, n. 7, 1985. p. 319-328.

KALAY, Y. E. The impact of information technology on design methods, products and practices. **Design Studies**, v. 27, n. 3, 2006. p. 357-380.

KANG, T-W.; CHOI, H-S. BIM perspective definition metadata for interworking facility management data. **Advanced Engineering Informatics**, v. 29, n. 4, 2015. p. 958–970.

KENSEK, K.; NOBLE, D. **Building Information Modeling: BIM in Current and Future Practice**. Hoboken: Wiley-Blackwell, 2014.

KITCHENHAM, B. et al. Systematic literature reviews in software engineering: A systematic literature review. **Information and Software Technology**, v. 51, n. 1, 2009. p. 7–15.

KILKELLY, M. **Seriam os computadores ruins para a arquitetura?** ArchDaily Brasil, 2015A. Acesso em 20 dez 2016: <http://www.archdaily.com.br/br/765339/seriam-os-computadores-ruins-para-a-arquitetura>

KILKELLY, M. **5 razões para arquitetos aprenderem programação**. ArchDaily Brasil, 2015B. Acesso em 20 dez 2016: <http://www.archdaily.com.br/br/764687/5-razoes-de-porque-os-arquitetos-devem-aprender-a-programar-sofware>s

KRISH, S. A practical generative design method. **Computer-Aided Design**, v. 43, n. 1, 2011. p. 88–100.

LAWSON, B. **Como Arquitetos e Designers Pensam**. São Paulo: Oficina de Textos, 2011.

LEITÃO, A. et al. Programming Languages For Generative Design: A Comparative Study. **International Journal of Architectural Computing**, v. 10, n. 1, 2012. p. 139-162.

LU, Q.; WON, J.; CHENG, J. C. P. A financial decision making framework for construction projects based on 5D Building Information Modeling (BIM). **International Journal of Project Management**, v. 34, n. 1, 2016. p. 3–21.

MCKINNEY, K.; FISCHER, M. Generating, evaluating and visualizing construction schedules with CAD tools. **Automation in Construction**, v. 7, n. 6, 1998. p. 433–447.

MITCHELL, M. **An Introduction to Genetic Algorithms**. Cambridge: The MIT Press, 1999.

MITCHELL, W. J. **A lógica da Arquitetura**. Campinas: Unicamp, 2008.

NIBS. **Frequently Asked Questions About the National BIM Standard - United States**. NIBS, 2016. Acesso em 11 ago 2016: <https://www.nationalbimstandard.org/faqs>

OLIVEIRA, M. R. Potential of Building Information Modeling (BIM) system. In: BARTOLO, P. J. d. S. et al. **Innovative Developments in Design and Manufacturing**. Boca Raton: CRC Press, 2009.

PREFEITURA MUNICIPAL DE JUIZ DE FORA. **LEI N.º 6909 - 31 de maio de 1986 [A]. Dispõe sobre as edificações no Município de Juiz de Fora.** Acesso em: 16 mar 2016: http://www.jflegis.pjf.mg.gov.br/c_norma.php?chave=0000019208

PREFEITURA MUNICIPAL DE JUIZ DE FORA. **LEI N.º 6910 - 31 de maio de 1986 [B]. Dispõe sobre o ordenamento do uso e ocupação do solo no Município de Juiz de Fora.** Acesso em: 16 mar 2016: http://www.jflegis.pjf.mg.gov.br/c_norma.php?chave=0000019210

PREFEITURA MUNICIPAL DE JUIZ DE FORA. **LEI COMPLEMENTAR Nº 005 - de 14 de novembro de 2013 [A]. Altera a Lei Municipal nº 6909, de 31 de maio de 1986, e dá outras providências.** Acesso em: 16 mar 2016: http://www.jflegis.pjf.mg.gov.br/c_norma.php?chave=0000036983

PREFEITURA MUNICIPAL DE JUIZ DE FORA. **LEI COMPLEMENTAR Nº 006 - de 27 de novembro de 2013 [B]. Altera a Lei Municipal nº 6.910, de 31 de maio de 1986, e dá outras providências.** Acesso em: 16 mar 2016: http://www.jflegis.pjf.mg.gov.br/c_norma.php?chave=0000037014

PREFEITURA MUNICIPAL DE JUIZ DE FORA. **Secretaria de Atividades Urbanas.** 2016. Acesso em: 16 fev 2016: <https://www.pjf.mg.gov.br/secretarias/sau/>

PRODANOV, C.C.; FREITAS, E.C. **Metodologia do Trabalho Científico: Métodos e Técnicas da Pesquisa e do Trabalho Acadêmico.** Novo Hamburgo: Editora Feevale, 2ª ed., 2013.

ROBERT MCNEEL & ASSOCIATES. **About Grasshopper...** s/d. Acesso em 28 jan 2016: <http://www.grasshopper3d.com/>

RODRIGUES, J. P. P. **Utilização de modelos BIM para verificação automática de projetos: plano de acessibilidades.** Porto: Universidade do Porto, 2015. Dissertação de Mestrado.

SCHEER, S.; ROMERO, J. **Potencial da Implementação do BIM no Processo de Aprovação de Projetos de Edificação na Prefeitura Municipal de Curitiba.** Anais do Simpósio Brasileiro de Qualidade do Projeto no Ambiente Construído. São Carlos, USP: 2009.

SCHUMACHER, P. **Parametricism as Style - Parametricist Manifesto.** 2008. Acesso em 20 set 2016: <http://www.patrikschumacher.com/Texts/Parametricism%20as%20Style.htm>

SHEA, K. et al. Towards integrated performance-driven generative design tools. **Automation in Construction**, v. 14, n. 2, 2005. p. 253–264.

SOUZA, L. L. A. d. et al. Impactos do uso do BIM em escritórios de arquitetura: oportunidades no mercado imobiliário. **Gestão & Tecnologia de Projetos**, v. 4, n. 2, 2009. p.26 – 53.

STEEL, J. et al. Model interoperability in building information modelling. **Software & Systems Modeling**, v. 11, n. 1, 2012. p. 99–109.

STINY, G.; GIPS, J. **Algorithmic Aesthetics: Computer Models for Criticism and Design in the Arts**. Berkeley: University of California Press, 1978.

TERZIDIS, K. **Algorithmic architecture**. Routledge: Nova York, 2006.

VRIES, M. d.; WAGTER, H. A CAAD model for use in early design phases. In: MCCULLOUGH, M. et al. **The electronic design studio: architectural knowledge and media in the computer era**. Cambridge: MIT Press, 1989.

APÊNDICES

APÊNDICE 1 – Normas Edilícias, ordenamento do uso e ocupação do solo, modelos de ocupação e considerações referentes à parametrização

Quadro 15 – Normas Edilícias (Lei Municipal nº 6909) e considerações referentes à parametrização

Item/seção	Regulamentação	Para metrizável	Abordada	Justificativa
Alinhamento e nivelamento	Define a relação do lote com as vias públicas, base para definição dos recuos, referência para afastamento em esquinas	Sim	Parcialmente	O reconhecimento dos limites do terreno se dá em função dos desenhos inseridos pelo usuário. As limitações em função das esquinas não foram adotadas visto que aumentariam a complexidade do processo, exigindo identificações para cada tipo de linha do terreno e cálculos específicos (matemáticos e geométricos).
Áreas de ventilação e iluminação	Estabelece os diâmetros de ventilação em função da altura da edificação e do tipo de ambiente a ser ventilado. Os ambientes podem ser classificados em: (a) compartimentos de permanência transitória e, (b) compartimentos de permanência prolongada. Para estes últimos, admite-se diferentes tipos de áreas para ventilação: (1) AA – área aberta: uma das faces voltadas para logradouro, via de acesso interno (min 9m) ou áreas com diâmetro de 15m. (2) AS – área semiaberta: uma das faces voltada para área aberta. (3) AF – área fechada: não se enquadra nas demais.	Sim	Não	Devido à natureza do parâmetro, sua aplicação no algoritmo dependeria de uma predefinição de ambientes em planta que traria uma complexidade muito maior para o processo.
Vãos de ventilação e iluminação	estabelece regras para dimensões mínimas do vão, em função da área dos ambientes e a	Sim	Não	Devido à natureza do parâmetro, sua aplicação no algoritmo dependeria de uma predefinição de ambientes

	profundidade máxima admitida em função da natureza e da forma dos ambientes.			em planta que traria uma complexidade muito maior para o processo.
Vãos de acesso	Definições para corredores de acesso	Sim	Parcialmente	São abordados de forma genérica a partir da definição de áreas de circulação
Classificação e altura	Estabelece a relação entre os tipos de ambientes e suas alturas mínimas	Sim	Sim	São abordados de forma genérica a partir da definição das alturas a serem adotadas para os pavimentos
Medidas gerais mínimas	dimensões mínimas para cada tipo de ambiente	Sim	Não	Devido à natureza do parâmetro, sua aplicação no algoritmo dependeria de uma predefinição de ambientes em planta que traria uma complexidade muito maior para o processo.
Copas e cozinhas	exigências mínimas de forma e área para cozinhas	Sim	Não	Devido à natureza do parâmetro, sua aplicação no algoritmo dependeria de uma predefinição de ambientes em planta que traria uma complexidade muito maior para o processo.
Compartimentos sanitários	Exigências mínimas quanto ao número necessário, bem como quanto à de forma, área e materiais de revestimento para banheiros	Parcialmente	Não	Devido à natureza do parâmetro, sua aplicação no algoritmo dependeria de uma predefinição de ambientes em planta que traria uma complexidade muito maior para o processo.
Corredores	Estabelece relações de profundidade e largura de corredores	Sim	Parcialmente	São abordados de forma genérica a partir da definição de áreas de circulação
Escadas de uso coletivo	Estabelece as referências para dimensionamento adequado das escadas, bem como formas de ventilação das mesmas	Sim	Parcialmente	São abordados de forma genérica a partir da definição de áreas de núcleo. Vale ressaltar que já foi desenvolvido um estudo para a parametrização de saídas de emergência para o estado de Minas Gerais.
Elevadores, escadas rolantes e rampas	Estabelece as referências para dimensionamento adequado	Sim	Parcialmente	São abordados de forma genérica a partir da definição de áreas de núcleo.
Garagens	Define dimensões mínimas para vagas em função de sua posição e a	Sim	Sim	São abordados de forma genérica a partir da definição de áreas de garagem em

	relação com as vias internas de acesso			função do número de unidades, relação vagas/unidade e área média das vagas.
Lojas, sobrelojas, compartimentos de lixo e galerias	Diretrizes específicas para cada caso em questão.	Sim	Parcialmente	Áreas de loja são abordadas como parte dos cálculos para ocupação, no entanto, os demais itens foram abordados de forma genérica a partir da definição de áreas de núcleo.
Marquises	Define o desenho e a posição admitidos para estes elementos	Sim	Não	Não se aplica ao nível de estudo ao qual o algoritmo se destina
Segurança contra incêndio e Pânico	Defini as normas a serem adotadas para tal	Sim	Parcialmente	São abordados de forma genérica a partir da definição de áreas de núcleo. Vale ressaltar que já foi desenvolvido um estudo para a parametrização de saídas de emergência para o estado de Minas Gerais.

Fonte: PREFEITURA MUNICIPAL DE JUIZ DE FORA, 2013 (editado pelo autor)

Quadro 16 – Ordenamento do uso e ocupação do solo (Lei Municipal nº 6910) e considerações referentes à parametrização

Item/seção	Regulamentação	Para metrizável	Abordada	Justificativa
Subdivisão da área urbana do distrito sede	Define as Unidades Territoriais da cidade, as quais são a base para o zoneamento	Indiretamente	Indiretamente	Escala superior de divisão do território e não apresenta parâmetros que interferem diretamente nos terrenos, apenas direciona o zoneamento.
Zoneamento	Define as Zonas Residencial, Comercial, Industrial e de Uso Múltiplo bem como suas subdivisões	Indiretamente	Indiretamente	Estabelece classificações que posteriormente serão especificadas através de parâmetros a partir de modelos de ocupação
Atividades e categorias de uso do solo	Estabelece as categorias: residencial, comercial, prestação de serviços, institucional, industrial, agropecuário e extrativo.	Indiretamente	Indiretamente	A classificação da atividade em conjunto com o zoneamento define o modelo de ocupação a ser adotado
Parcelamento do solo	Diretrizes para parcelamento	Não	Não	Não se aplica
Limitações e outras disposições urbanísticas	Diretrizes para definição de gabarito, área ocupada, área edificada, áreas de varanda, coberturas, etc.	Indiretamente	Indiretamente	Fornece as diretrizes para classificação e formas de cálculo, com isso direcionam as operações do algoritmo.

Fonte: PREFEITURA MUNICIPAL DE JUIZ DE FORA, 2013 (editado pelo autor)

Quadro 17 – Modelo de ocupação (Lei Municipal nº 6910) e considerações referentes à parametrização

Item/seção	Regulamentação	Para metrizável	Abordada	Justificativa
Área mínima	Área mínima do lote para adequação ao modelo em questão	Indiretamente	Indiretamente	Abordado através de um relatório de controle em função do limite permitido
Testada mínima	Testada mínima do lote para adequação ao modelo em questão	Indiretamente	Indiretamente	Abordado através de um relatório de controle em função do limite permitido
Modelo de ocupação	Classificação dos modelos de ocupação que são a fonte dos parâmetros a serem aplicados no projeto. (M1, M2, M3, M4, M5, M1A, M2A, M3A, M4A, M5A, M6A, M7A e M8A)	Sim	Sim	Classificação principal que define os parâmetros a serem utilizados para cada estudo. Os valores de todos os demais depende da classificação dos modelos de ocupação.
Coefficiente de aproveitamento	Estabelece a relação entre a área do lote e a área total edificada permitida	Sim	Sim	Define a área máxima para a edificação e, por consequência, é o principal gerador da forma.
Taxa de ocupação	Relação entre a área do lote e área máxima permitida para a projeção horizontal da edificação.	Sim	Sim	Define a ocupação máxima permitida, tendo reflexo direto na limitação da forma do volume final.
Afastamento frontal	Distância entre a edificação e a testada do lote	Sim	Sim	Limitador de posição do edifício e interfere diretamente na altura máxima permitida
Afastamento lateral e fundos	Distância entre a edificação e as demais divisas do lote	Sim	Sim	Limitador de posição do edifício

Fonte: PREFEITURA MUNICIPAL DE JUIZ DE FORA, 2013 (editado pelo autor)

ANEXOS

ANEXO 1 – Normas Edilícias da cidade de Juiz de Fora

Quadro 18 – modelos de ocupação segundo o código de obras de Juiz de Fora

Lote		Modelo	Coeficiente de aproveitamento máximo	Taxa de ocupação máxima	Afastamento frontal mínimo (m)	Afastamento lateral e fundos mínimos (m)	Modelo	Coeficiente de aproveitamento máximo	Taxa de ocupação máxima	Afastamento frontal mínimo (m)	Afastamento lateral e fundos mínimos (m)
Área mínima (m ²)	Testada Mínima (m)										
		M1	1.0	65%	3,0	Lote > 300 m ² Uma divisa=0 Demais=1,5	M1A	1.0	1º ao 3º pav.=100% (até 9,20m de altura) Demais pav.=65%	2,0	1º ao 3º pav.=0 Demais pav.: uma divisa=0 demais=1,5
		M2	1.3				M2A	1.65			
300			1.7*					2.1*			
300	10	M3	1.8	50%	3,0	testada ≤ 12m Uma divisa=0 Demais=1,5 Testada > 12m 1,5	M3A	2.2	1º ao 3º pav.=100% (até 9,20m de altura) Demais pav.=50%	2,0	1º ao 3º pav.=0 Demais pav. Testada ≤ 12m: uma divisa=0 demais=1,5 testada > 12: 1,5
360			2.4*					2.8*			
360	10		2.5								
450	12	M4	2.8*	50%	3,0	2,0	M4A	3.0	1º ao 3º pav.=100% (até 9,20m de altura) Demais pav.=50%	2,0	1º ao 3º pav.=0 Demais pav. Testada ≤ 12m: uma divisa=0 demais=1,5 testada > 12: 1,5
450	12	M5	3.0				M5A	3.5			
550	12										
700	15						M6A	4.5	1º ao 4º pav.=100% (até 12m de altura) Demais pav.=50%	2,0	1º ao 4º pav.=0 Demais:2,0
1200	18					M7A	5.5				
						M8A	6.5				

Para utilização dos coeficientes assinalados com (), deverão ser observadas as seguintes relações mínimas de vagas/apartamento:
 $AP \leq 55m^2 = 1 \text{ vaga}/2 \text{ apartamentos}$, $55m^2 < AP < 100m^2 = 1 \text{ vaga}$, $100m^2 \leq AP < 160m^2 = 2 \text{ vagas}$,
 $AP \geq 160m^2 = 3 \text{ vagas}$; onde AP= área total do apartamento

Fonte: http://www.jflegis.pjf.mg.gov.br/c_norma.php?chave=0000037014, adaptado pelo autor

GLOSSÁRIO

Afastamentos: distância mínima permitida entre a edificação e os limites laterais e de fundos de um terreno

Algoritmo: conjunto das regras e procedimentos lógicos perfeitamente definidos que levam à solução de um problema em um número finito de etapas.

Alinhamento: limite entre terreno e a/as via/vias de acesso

Área equivalente de vagas: proporção da área total de um estacionamento referente a uma vaga. Composta por área real da vaga e a fração das vias e circulações referente a esta vaga

Área privativa: área total de uma unidade residencial, comercial ou de serviços

Área total de núcleos e circulações: soma das áreas de escadas, antecâmaras, dutos de ventilação, elevadores, halls e circulações.

Autômatos Celulares: grelha infinita e regular de células, cada uma podendo estar em um número finito de estados, que variam de acordo com regras determinísticas.

BIM 4D: modelo tridimensional que reúne também informações temporais, fases de projeto ou mesmo cronogramas de construção

BIM 5D: além do modelo 4D, aborda custos e programações

BIM 6D: modelo que além do 4D inclui questões de sustentabilidade

BIM: Building Information Modeling, Modelagem da Informação da Construção

Briefing: resumo das informações iniciais necessárias para um projeto, em geral envolvendo, usos, programa de necessidades, dimensões iniciais.

CAD: Computer Aided Design, Desenho Auxiliado por Computador

Caixa da rua: dimensão transversal total da rua, medida entre os limites frontais dos terrenos e composta pelas calçadas, via de tráfego.

CAPES: Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior

Cluster: agrupamento de entidades

Coefficiente de aproveitamento: em geral apresentado como um valor a ser multiplicado pela área do terreno, pode ser definido como a proporção que define seu potencial construtivo.

Documentação 2D: plantas baixas, cortes, elevações, detalhes construtivo e demais desenhos referentes aos projetos arquitetônico

Embasamento: volume inferior de um edifício, em geral composto por garagens e áreas comerciais/serviços que serve de base para a torre.

Estudos de massa: estudo volumétrico desenvolvido para um projeto

Fluxogramas de processamento: representação através de símbolos geométricos convencionais do raciocínio lógico com o qual se resolverá o problema

Fractais: Um fractal é um objeto geométrico que pode ser dividido em partes, cada uma das quais semelhante ao objeto original. Em muitos casos um fractal pode ser gerado por um padrão repetido, tipicamente um processo recorrente ou iterativo.

Gabarito: altura máxima permitida para uma edificação

Gramática da Forma: sistema de geração de formas baseado em regras

Grasshopper: extensão baseada em VPL para o programa Rhinoceros, tem como objetivo gerar modelos 3D parametrizados.

Hoopsnake: Plug-in do Grasshopper capaz de criar e controlar loops em um algoritmo

IFC: Industry Foundation Classes

Inputs: entradas em um sistema, dados, informações, subsídios etc.

Linguagem de programação: método padronizado para comunicar instruções para um computador.

Modelo de ocupação: instrumento legal que define os padrões de uso e ocupação a serem seguidos para determinado terreno

Object Oriented Design: projeto orientado ao objeto

Offset: gera entidades (linhas, arcos, figuras etc) paralelas a outra entidade a partir de uma dimensão e uma direção determinadas

Outputs: saídas de um sistema, dados, informações, subsídios etc.

Parametrização: modelagem tridimensional baseada em objetos sem geometrias ou propriedades fixas, sua construção se dá em função de regras e relações mútuas permitindo a automatização de modificações e ajustes.

Pé-direito: dimensão vertical livre de um pavimento, distância entre o piso e o teto.

Plug-in: módulo de extensão para um programa

Potencial construtivo: área total permitida para construção em determinado terreno

Recuo: distância mínima permitida entre a edificação e o limite frontal de um terreno

Renderização: processo pelo qual se obtém o produto final de um processamento digital qualquer. No caso de modelos tridimensionais trata-se da geração de imagens/vídeos foto-realísticos.

Rhinoceros: programa de modelagem tridimensional

RSL: Revisão Sistemática de Literatura

Sistemas generativos: qualquer prática de projeto, na qual o projetista usa um sistema com algum nível de autonomia, para produzir a solução para o problema de projeto

Taxa de ocupação: valor que define a porção de um terreno livre para ocupação.

Testada: extensão total do limite entre terreno e via/vias de acesso

Torre: volume vertical de um edifício, em geral voltado para seu uso principal

TPL: Linguagens de programação textuais

Usabilidade: otimização das interações entre pessoas e produtos para que estes sejam agradáveis, efetivos de se usar e fáceis de se aprender da perspectiva do usuário

VPL: Linguagens de programação visuais