

# Métricas urbanas ↔↔

Sistema (para)métrico para análise e otimização de configurações urbanas de acordo com métricas de avaliação de desempenho

Fernando Lima

Rio de Janeiro  
2017



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO  
Centro de Letras e Artes / Faculdade de Arquitetura e Urbanismo  
Programa de Pós-graduação em Urbanismo – PROURB

**Fernando Tadeu de Araújo Lima**

## **MÉTRICAS URBANAS:**

**Sistema (para)métrico para análise e otimização de configurações urbanas de acordo com métricas de avaliação de desempenho**

Rio de Janeiro

2017

Fernando Tadeu de Araújo Lima

## **MÉTRICAS URBANAS:**

### **Sistema (para)métrico para análise e otimização de configurações urbanas de acordo com métricas de avaliação de desempenho**

Orientador: Prof. Dr. José Ripper Kós

Coorientador: Prof. Dr. Rodrigo Cury Paraízo

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Urbanismo, PROURB, da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos para a obtenção do Grau de Doutor em Urbanismo.

Rio de Janeiro

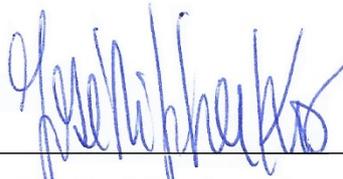
2017

## MÉTRICAS URBANAS:

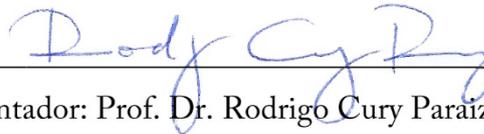
### Sistema (para)métrico para análise e otimização de configurações urbanas de acordo com métricas de avaliação de desempenho

**Fernando Tadeu de Araújo Lima**

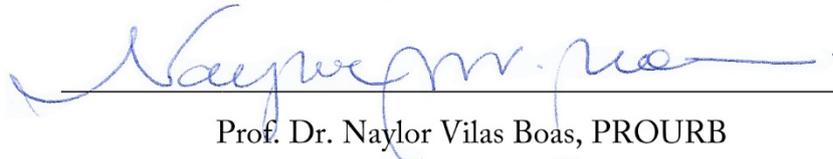
Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Urbanismo, PROURB, da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos para a obtenção do Grau de Doutor em Urbanismo. Aprovada por:



Orientador: Prof. Dr. José Ripper Kós, PROURB



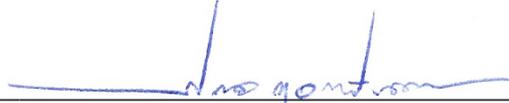
Co-orientador: Prof. Dr. Rodrigo Cury Paraizo, PROURB



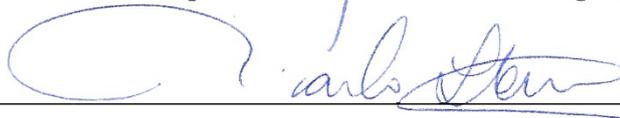
Prof. Dr. Naylor Vilas Boas, PROURB



Prof. Dra. Maria Gabriela Caffarena Celani, UNICAMP



Prof. Dr. Nuno Filipe Santos de Castro Montenegro, ULisboa



Prof. Dr. Ricardo Esteves, PUC - RIO

Rio de Janeiro, 28 de abril de 2017

## CIP - Catalogação na Publicação

L732m Lima, Fernando Tadeu de Araujo  
Métricas Urbanas: Sistema (para)métrico para análise e otimização de configurações urbanas de acordo com métricas de avaliação de desempenho / Fernando Tadeu de Araujo Lima. -- Rio de Janeiro, 2017.  
236 f.

Orientador: José Ripper Kós.  
Coorientador: Rodrigo Cury Paraízo.  
Tese (doutorado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Programa de Pós-Graduação em Urbanismo, 2017.

1. Projeto Urbano. 2. Lógica algorítmica. 3. Parametrização. 4. Desenvolvimento Orientado pelo Transporte. 5. Otimização. I. Kós, José Ripper, orient. II. Paraízo, Rodrigo Cury, coorient. III. Título.

Aos meus filhos João Fernando e Antônia, cuja saudade eu trago sempre comigo.

À minha filha Manuela, que faz tudo valer a pena.

## AGRADECIMENTOS

Ao **PROURB** – Programa de pós-graduação em Urbanismo da Universidade Federal do Rio de Janeiro e a todo o grupo de professores, funcionários e colegas de doutorado que me ajudaram durante toda esta longa jornada.

Ao **CNPq** – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, pelo suporte financeiro garantido através da bolsa de estudos outorgada para o meu período de doutoramento sanduíche na Faculdade de Arquitetura da Universidade de Lisboa.

Ao **CIAUD** – Centro de Investigação em Arquitetura, Urbanismo e Design da Universidade de Lisboa, pelo apoio financeiro que me permitiu participar e apresentar trabalhos em importantes eventos internacionais, o que foi de grande contribuição para o desenvolvimento desta investigação.

Ao meu orientador, **Prof. Dr. José Ripper Kós**, pelas indicações de caminhos a serem seguidos, por ter sido o primeiro a incentivar meu período de doutoramento sanduíche e pelo apoio e confiança em mim depositados.

Ao meu coorientador, **Prof. Dr. Rodrigo Cury Paraízo**, pelas preciosas contribuições a esta tese e por ter estado comigo nesta jornada desde o princípio.

Ao **Prof. Dr. Nuno Montenegro**, meu supervisor em Portugal, pelo aprendizado, pela amizade e pelo inestimável apoio ao desenvolvimento deste trabalho enquanto estive em terras portuguesas.

Aos Professores Doutores **José Pinto Duarte** e **José Nuno Beirão**, por meio dos quais eu estendo meus agradecimentos a todos os colegas do **DCG – Design Computation Group**, da Faculdade de Arquitetura da Universidade de Lisboa, pelas importantes contribuições ao meu trabalho durante o ano em que cursei o doutorado sanduíche em Lisboa.

À **Universidade Federal de Juiz de Fora**, por meio da qual eu estendo meus agradecimentos à **Faculdade de Arquitetura e Urbanismo (FAU-UFJF)** e ao **Departamento de Projeto, Representação e Tecnologia (DPRT-FAU-UFJF)**, pelo suporte institucional, pessoal e científico que me foi proporcionado nesta jornada.

À minha amada família: minha esposa **Sabrina**, pelo amor, inspiração, cumplicidade e sacrifícios, especialmente, nestes anos de doutoramento; minha filha **Manuela**, pela alegria e significado que me dá, mesmo sem perceber; minha mãe **Anézia**, por ter me ensinado a ser quem eu sou e pelo amor e compreensão; minha irmã **Fátima**, com quem sei que sempre posso contar, e meu irmão **Jorge**, que mesmo um pouco mais distante, torce por mim.

A **Deus** por tudo, mas, em especial, pela saúde e força.

## RESUMO

LIMA, Fernando Tadeu de Araújo. **Métricas Urbanas: Sistema (para)métrico para análise e otimização de configurações urbanas de acordo com métricas de avaliação de desempenho**. Rio de Janeiro, 2017. Tese (Doutorado em Urbanismo) Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017

Esta investigação centra-se na elaboração de um sistema que articula métricas de avaliação de desempenho a recursos e funcionalidades algorítmico-paramétricas, de maneira a permitir analisar e otimizar diferentes aspectos relativos ao grau de eficiência e às possibilidades de operação de configurações geométricas e algébricas de uma determinada área urbana. Neste âmbito, esta tese aborda o uso de recursos computacionais e ferramentas algorítmicas especificamente elaboradas para mensurar a performance de áreas urbanas, sob a perspectiva de princípios objetivamente mensuráveis do Desenvolvimento Orientado pelo Transporte (DOT), um modelo de desenvolvimento urbano que visa a cidades mais autônomas e mais sustentáveis. Mais especificamente, a presente pesquisa visa a verificar como atributos mensuráveis, geométricos e algébricos (e, portanto, programáveis) do DOT podem ser implementados por meio de um modelo computacional que utiliza métodos de otimização para dar suporte à tomada de decisão no processo de projetos urbanos. Assim, este trabalho é orientado no sentido da elaboração de um sistema que possa ser integrado a processos de projeto urbano, fornecendo suporte à organização de bairros e cidades e contribuindo para o aprimoramento das possibilidades de análise e proposição em contextos urbanísticos.

**Palavras-chave:** Projeto urbano; lógica algorítmica; parametrização; Desenvolvimento Orientado pelo Transporte; otimização.

## ABSTRACT

LIMA, Fernando Tadeu de Araújo. **Urban metrics: (Para)metric system for analysis and optimization of urban configurations according to performance evaluation metrics.** Rio de Janeiro, 2017. Tese (Doutorado em Urbanismo) Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017

This research focuses on the development of a system that articulates performance evaluation metrics to algorithmic-parametric features and functionalities, in order to analyze and optimize different aspects related to the degree of efficiency and to the possibilities of operation of geometric and algebraic configurations of a given urban area. In this context, this thesis deals with the use of computational resources and algorithmic tools specifically designed to assess the performance of urban areas, from the perspective of objectively measurable principles of Transit Oriented Development (TOD), an urban development model aimed at more autonomous and sustainable cities. More specifically, the present research aims at verifying how TOD's measurable, geometric and algebraic (and therefore programmable) attributes can be implemented through a computational model that uses optimization methods to support decision making in urban design processes. Thus, this work is oriented toward the elaboration of a system that can be integrated to urban design processes, providing support to the organization of neighborhoods and cities and contributing to the improvement of analysis and proposition possibilities in urbanistic contexts.

**Keywords:** Urban design; algorithmic logic; parametrization; Transit Oriented Development; optimization.

## SUMÁRIO

RESUMO .....	5
ABSTRACT .....	6
SUMÁRIO.....	7
LISTA DE ILUSTRAÇÕES.....	10
<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>18</b>
Âmbito .....	22
Enquadramento .....	25
Questões.....	31
Objetivos .....	32
Objetivo geral.....	32
Objetivos específicos .....	32
Procedimentos metodológicos .....	34
Organização desta tese.....	36
<b>Capítulo 1   DESENVOLVIMENTO ORIENTADO PELO TRANSPORTE .....</b>	<b>38</b>
1.1. Contextualização .....	41
1.2. DOT - Conceito e definições, vantagens e limitações, relevância e tipologias.....	47
1.2.1. Conceito e definições.....	47
1.2.2. Vantagens e limitações .....	53
1.2.3. Relevância.....	54
1.2.4. Tipologias .....	55
1.3. Princípios mensuráveis e referências de cálculo para o DOT.....	58
1.3.1. Acessibilidade ao transporte .....	59
1.3.2. Caminhabilidade .....	64
1.3.3. Diversidade.....	69
1.3.4. Compacidade.....	71
1.4. Reflexões sobre o DOT .....	77

## Capítulo 2 | APLICAÇÕES COMPUTACIONAIS PARA PROBLEMAS URBANOS

.....	79
2.1. Lógica algorítmico-paramétrica em contexto urbanístico.....	82
2.1.1. Lógica algorítmica.....	83
2.1.2. Modelagem paramétrica.....	85
2.1.3. Lógica algorítmico-paramétrica.....	87
2.2. Modelos de aplicações computacionais no contexto urbano.....	89
2.2.1. City Induction - modelo de Duarte et al (2012).....	89
2.2.2. CiTyMaker - modelo de Beirão (2012).....	93
2.2.3. CityPlan - modelo de Montenegro (2015).....	95
2.2.4. Configurbanist - modelo de Nourian et al (2015).....	97
2.3. Funcionalidades algorítmico-paramétricas para formulações urbanas.....	99
2.3.1. Plugins para obtenção de dados.....	99
2.3.2. Plugins de abordagem métrica.....	102
2.3.3. Plugins para otimização.....	108
2.4. Reflexões sobre aplicações computacionais no contexto urbanístico.....	111

## Capítulo 3 | CITYMETRICS - Sistema (para)métrico para análise e otimização de configurações urbanas de acordo com métricas de avaliação de desempenho..... 113

3.1. A designação CityMetrics.....	116
3.2. Estratégias computacionais para a formulação de CityMetrics.....	117
3.2.1. Linguagem de Programação Visual (LPV).....	117
3.2.2. Sistemas Generativos (SG).....	119
3.2.3. Otimização matemática.....	122
3.2.4. Articulação das estratégias adotadas.....	125
3.3. O Conceito de CityMetrics.....	128
3.4. Ferramentas e métricas para análise e otimização de configurações urbanas.....	131
3.4.1. Algoritmo de Proximidade Física (APF).....	131
3.4.2. Algoritmo de Variedade de Serviços (AVS).....	135
3.4.3. Algoritmo de Recorrência de Serviços (ARS).....	137
3.4.4. Algoritmo de Proximidade Topológica (APT).....	138
3.4.5. Algoritmo de Uso Misto (AMXI).....	141

3.4.6.	Algoritmo de Indicadores Spacematrix .....	142
3.5.	Reflexões sobre o sistema e as ferramentas propostas .....	144
<b>Capítulo 4   ENSAIOS PRELIMINARES – avaliação de CityMetrics em diferentes abordagens .....</b>		<b>145</b>
4.1.	Ensaio preliminar 1 – Prova de Conceito .....	149
4.1.1.	Resultados.....	159
4.2.	Ensaio preliminar 2 – Evolução da prova de conceito .....	161
4.2.1.	Resultados.....	169
4.3.	Ensaio preliminar 3 – Otimização multi-objetivo em área existente .....	171
4.3.1.	Resultados.....	180
4.4.	Ensaio preliminar 4 – Métricas físicas e topológicas em área existente .....	184
4.4.1.	Resultados.....	191
4.5.	Análise comparativa dos Ensaios preliminares.....	196
4.5.1.	Ensaio preliminar 1 x Ensaio preliminar 2.....	196
4.5.2.	Ensaio preliminar 2 x Ensaio preliminar 3.....	199
4.5.3.	Ensaio preliminar 3 x Ensaio preliminar 4.....	201
4.6.	Reflexões sobre os Ensaios preliminares .....	204
<b>Capítulo 5   TESTES COM USUÁRIOS .....</b>		<b>205</b>
5.1.	Objetivos.....	208
5.2.	Participantes dos workshops.....	209
5.3.	Estruturação e sequência das etapas dos workshops.....	211
5.4.	Metodologia para avaliação de CityMetrics .....	215
5.5.	Resultados.....	217
5.6.	Reflexões sobre as avaliações .....	219
<b>CONCLUSÃO E CONTRIBUIÇÕES .....</b>		<b>220</b>
	Conclusão e contribuições .....	222
	Desdobramentos e trabalhos futuros .....	226
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>		<b>227</b>

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- Figura 1. Diagrama de síntese do âmbito desta pesquisa. Fonte: O autor..... 24
- Figura 2. Eastshore Freeway, na Califórnia, e o paradigma de desenvolvimento das cidades contemporâneas: automóveis e congestionamento, edifícios e bairros monofuncionais. Fonte: Wikipédia (2015) ..... 43
- Figura 3. Proposta de intervenção urbana em Edmonton, Canadá. Transporte coletivo, diversidade e urbanidade em um conceito de desenvolvimento urbano voltado para as pessoas. Fonte: Smart Growth (2015) ..... 44
- Figura 4. Valores de referência para distâncias ideais entre a estação e as demais localidades de um bairro, considerando deslocamentos feitos a pé ou de bicicleta. Fonte: Adaptado de Human Transit (2015). 62
- Figura 5. Exemplos da diferença entre o cálculo dos percursos de 400m de distância (linhas pretas) para uma estação de transporte (ponto vermelho) considerando o desenho das ruas em contraponto ao cálculo que considera um círculo de raio de 400m como limite. Fonte: Adaptado de: <http://www.humantransit.org>. Acesso em 08 de jun. de 2015. .... 62
- Figura 6. Modelo de metabolismo urbano defendido pelo DOT. Cidade caminhável, compacta e multifuncional com distâncias que podem ser vencidas a pé. Pretende-se a substituição de uma lógica que preconiza muitos deslocamentos baseados em automóveis por uma lógica que incentive maior quantidade de deslocamentos mais curtos (a pé ou bicicleta) e menor quantidade de trajetos de carro. Fonte: Stuchi & Leite (2015, pp 58-59)..... 65
- Figura 7. A distância entre funções urbanas e um determinado local determina seu Walkscore. Um algoritmo que calcule esta relação, pode alimentar um sistema que permita propor vizinhanças com caminhabilidade otimizada. Fonte: Walkscore (2014). .... 67
- Figura 8. Modelo de cidade policêntrica. Vizinhanças articuladas em rede e conectadas por um sistema de transporte eficiente com diversidade de modais se relacionam diretamente com o conceito de diversidade nos bairros. Fonte: Stuchi & Leite (2015, p. 56). .... 70
- Figura 9. Esquema de funcionamento da cidade compacta. Fonte Rogers (1997, p.39)..... 72
- Figura 10. Ilustração dos parâmetros de cálculo para FSI, GSI e N, respectivamente. Fonte: Pont & Haupt (2010, p.77)..... 75

Figura 11. Estrutura conceitual básica do projeto City Induction, desenvolvimento de modelos integrados para a formulação, a geração e a avaliação de planos urbanos. Fonte: Duarte et al (2012, p. 84) .....	92
Figura 12. Prova de conceito de CItYMaker elaborada por Beirão (2012). As três imagens à esquerda mostram três grelhas possíveis. O canto superior direito mostra a interface de saída de dados em que os indicadores de densidade são mostrados na escala do distrito, na escala da quadra e por quadra. O canto inferior direito mostra a distribuição dos usos comercial e residencial no plano proposto. Fonte: Beirão (2012, p. 213).....	95
Figura 13. Modelo global proposto por Montenegro para a formulação de programas urbanos e o desenvolvimento de uma ferramenta de apoio ao projeto com este fim. Fonte: Montenegro (2015, p. 72) .....	96
Figura 14. Parte da cidade de Juiz de Fora, Minas Gerais, vista na interface do Open Street Maps (acima) e no modelo importado pelo Elk para o Grasshopper (abaixo). Fonte: O autor. ....	101
Figura 15. Utilização do ShortestWalk para cálculo do menor trajeto entre dois pontos em diferentes situações. Fonte: Food4Rhino (2016).....	104
Figura 16. O plugin Cheetah-The configurbanist em funcionamento. Fonte: Pirouznourian (2016). .....	106
Figura 17. Avaliações de medidas sintáticas por meio de Syntatic. Fonte: O autor. ....	107
Figura 18. Interface de resultados do Galapagos. Na parte inferior direita, a apresentação das soluções hierarquizadas de acordo com o atendimento ao critério pré-estabelecido. Fonte: O autor.....	109
Figura 19. Interface de resultados do Octopus: Cada eixo representa uma função objetivo e cada linha que passa por estes eixos representa uma solução de pareto. Em amarelo, uma solução selecionada. Fonte: O autor. ....	110
Figura 20. Exemplo de parte de algoritmo construído no Grasshopper. As relações entre as partes de um código se dão por meio de linhas que conectam os outputs de um componente e os inputs de outro. Estes códigos podem ainda ser combinados e compartilhados com códigos de outros usuários, pois estão inseridos na lógica de open source. Fonte: O autor. ....	119
Figura 21. Diagrama de Fischer e Herr, comparando o conceito do processo “tradicional” ao conceito do processo generativo. Enquanto na primeira situação o foco se encontra no resultado, ou no produto,	

na abordagem generativa o foco está na produção dos mecanismos que irão gerar o resultado. Isso propõe importantes modificações na lógica de trabalho. Fonte: Celani (2011).....	120
Figura 22. Interface do plugin Octopus para otimização multi-objetivo. Cada ponto neste gráfico tridimensional representa uma solução que visa a realizar trade-offs entre cada uma das funções objetivo a serem atendidas. Fonte: O autor. ....	124
Figura 23. Articulação das estratégias fundamentais para a formulação e utilização do sistema proposto. CityMetrics se estabelece por meio da elaboração de Sistemas Generativos construídos em Linguagem de Programação Visual, para mensurar, utilizando métricas de desempenho, características relacionadas aos princípios mensuráveis do DOT, associando-os a diferentes funções-objetivo em problemas de otimização, de maneira a fornecer soluções ótimas para configurações geométricas urbanas. Fonte: O autor. ....	126
Figura 24. Lógica do cálculo do APF para múltiplos alvos: o algoritmo calcula os menores percursos físicos para todos os alvos (serviços) em uma categoria. Em seguida, identifica o serviço com menor distância física (em vermelho) e mensura a sua proximidade para a origem com base nesta distância (incluindo possíveis inclinações e suas respectivas penalizações). Fonte: O autor. ....	134
Figura 25. Interface do Cluster do APF. À esquerda, as informações necessárias (entradas) para os cálculos da ferramenta (pontos referenciando as posições das origens e dos alvos, curvas referenciando o desenho das ruas e dados para referenciar diferentes densidades - pesos para o cálculo). À direita, o resultado de suas operações. Fonte: O autor. ....	135
Figura 26. Base de cálculo do AVS: o algoritmo considera a distância para todos os alvos e calcula a média das distâncias para estabelecer sua pontuação. Fonte: O autor. ....	136
Figura 27. Interface do Cluster do AVS. À esquerda, as informações necessárias (entradas) para os cálculos da ferramenta. À direita, o resultado de suas operações. Fonte: O autor. ....	136
Figura 28. O ARS identifica todos os serviços em uma determinada categoria (em vermelho), todas as localidades em um determinado raio de alcance de até 20 min de caminhada (em amarelo) e informa a proporção entre eles. Fonte: O autor. ....	137
Figura 29. Interface do Cluster do ARS. À esquerda, as entradas para os cálculos da ferramenta (pontos referenciando as posições das origens e dos alvos, curvas emulando o desenho das ruas e dados para representar diferentes pesos para o cálculo). À direita, o resultado de suas operações. Fonte: O autor. ....	138

Figura 30. Ilustração do cálculo do APT: pela métrica topológica, o serviço 2 é o mais próximo da origem, pois se encontra no mesmo espaço topológico e não demanda mudança de direção, ou conexão. Ou seja, apesar de o serviço 2 se encontrar fisicamente mais distante da origem considerada do que o serviço 3, a distância topológica entre a origem e o serviço 2 é menor. Fonte: O autor. ....	140
Figura 31. Interface do Cluster do APT. À esquerda, as entradas para os cálculos da ferramenta. À direita, o resultado de suas operações. Fonte: O autor.....	140
Figura 32. O AMXI realiza o cálculo da soma de todas as áreas residenciais (em magenta) e não residenciais (em verde) de uma localidade, calculando a proporção entre elas. Fonte: O autor.....	142
Figura 33. Interface do Cluster do AMXI. À esquerda, as entradas para os cálculos da ferramenta. À direita, o resultado de suas operações. Fonte: O autor.....	142
Figura 34. Elementos utilizados para cálculo dos indicadores Spacematrix: valor total de áreas construídas, de áreas ocupadas, comprimento de rede de ruas e área total, respectivamente. Fonte: Adaptado de Pont & Haupt (2010). ....	143
Figura 35. Interface do Cluster do algoritmo para cálculo dos indicadores Spacematrix. À esquerda, as entradas para os cálculos da ferramenta. À direita, o resultado de suas operações. Fonte: O autor....	143
Figura 36. Estrutura dos ensaios preliminares que serão apresentados neste capítulo. As setas em vermelho indicam momentos de transição metodológica entre cada abordagem, permitindo compará-las para a avaliação de CityMetrics em diferentes contextos, por meio das assimetrias adotadas. A cada ensaio, a quantidade e a complexidade das variáveis consideradas aumenta. Fonte: O autor. ....	148
Figura 37. Sequência de etapas do experimento referente ao ensaio preliminar 1. Fonte: O autor....	149
Figura 38. Descrição detalhada do experimento referente ao ensaio preliminar 1. Parte 1. Fonte: O autor. ....	150
Figura 39. Descrição detalhada do experimento referente ao ensaio preliminar 1. Parte 2. Fonte: O autor. ....	151
Figura 40. Descrição detalhada do experimento referente ao ensaio preliminar 1. Parte 3. Fonte: O autor. ....	152
Figura 41. Processo para divisão da área inicial em unidades de vizinhança, com as posições das estações determinadas por suas áreas de influência. Fonte: O autor.....	153

Figura 42. Alguns dos possíveis arranjos avaliados e a configuração “ótima” encontrada. Ou seja, aquela que forneceu a menor distância média entre todos os lotes e a estação, ou a maior acessibilidade ao transporte. Fonte: O autor. ....	154
Figura 43. Processo de otimização do índice de Proximidade Física (PF) para posicionamento dos serviços. A cada etapa, eram selecionadas as quadras para implementação de cada categoria de serviço, representadas na imagem, por meio de cores diferentes. Fonte: O autor. ....	155
Figura 44. Cálculo das distâncias para a estação ou subestações, para determinação das alturas máximas dos edifícios. Fonte: O autor. ....	156
Figura 45. Controle paramétrico das alturas das edificações e da densidade da área analisada. O arranjo das geometrias das edificações foi elaborado de maneira a atender à densidade populacional necessária ao modal adotado, bem como a permitir maiores alturas (e, conseqüentemente, concentração de pessoas), de acordo com a PF para a estação ou subestações. Fonte: O autor. ....	157
Figura 46. Distribuição parametrizada entre áreas residenciais e não residenciais, com base no Mixed-Use Index. Fonte: O autor. ....	158
Figura 47. Índices de PF (globais) para os serviços de cada um dos edifícios propostos. Fonte: O autor. ....	159
Figura 48. Sequência de etapas do referente ao ensaio preliminar 2. Fonte: O autor. ....	161
Figura 49. Descrição detalhada do experimento referente ao ensaio preliminar 2, Parte 1. As diretrizes e os inputs são os mesmos do experimento anterior, entretanto, a utilização de otimização multicritério significou a diminuição do número de etapas e uma nova dinâmica para este segundo ensaio preliminar. Fonte: O autor. ....	162
Figura 50. Descrição detalhada do experimento referente ao ensaio preliminar 2. Parte 2. Fonte: O autor. ....	163
Figura 51. Gráficos apresentando o conjunto de soluções de pareto (à esquerda) e a solução adotada para prosseguimento do ensaio preliminar (à direita). Fonte: O autor. ....	165
Figura 52. Processo de otimização do índice de Proximidade Física (PF) para posicionamento dos serviços. Neste segundo experimento, as categorias de serviços foram abordadas simultaneamente, o que significou um número significativamente menor de operações. Fonte: O autor. ....	166

Figura 53. Controle paramétrico das alturas das edificações e da densidade da área analisada. O arranjo das geometrias das edificações foi elaborado de maneira a atender à densidade populacional necessária ao modal adotado, bem como à permitir maiores alturas (e, conseqüentemente, concentração de pessoas) de acordo com a PF para a estação ou subestações	Fonte: O autor. ....	167
Figura 54. Distribuição parametrizada entre áreas residenciais e não residenciais, com base no Mixed-Use Index.	Fonte: O autor. ....	168
Figura 55. Índices de Proximidade Física (globais) de cada um dos edifícios propostos algoritmicamente.	Fonte: O autor.....	168
Figura 56. Posição da cidade de Juiz de Fora (acima à esquerda), imagem aérea do bairro Cascatinha (acima à direita) e imagem 3D do bairro (abaixo).	Fonte: O autor. ....	172
Figura 57. Sequência de etapas do experimento referente ao ensaio preliminar 3.	Fonte: O autor....	172
Figura 58. Descrição detalhada do experimento referente ao ensaio preliminar 3.	Fonte: O autor. ..	173
Figura 59. Imagem de parte do modelo de análise utilizado no experimento referente ao ensaio preliminar 3. Ruas, quadras, lotes e serviços emulados por entidades geométricas.	Fonte: O autor. .	174
Figura 60. Relação de Proximidade Física entre os edifícios do bairro e a estação (em azul), cuja localização foi indicada por meio de otimização. Cada edificação se encontra preenchida por uma cor que corresponde ao seu índice de PF para a estação.	Fonte: O autor. ....	175
Figura 61. Interface do plugin de otimização para posicionamento dos novos serviços. Diferentes eixos ilustrando as diferentes funções-objetivo adotadas e as linhas que cruzam estes eixos representam as soluções de Pareto. Em amarelo, a solução adotada para desenvolvimento.	Fonte: O autor.....	176
Figura 62. Localização dos serviços existentes no bairro (acima) e a proposta para inserção de novos serviços, após otimização (abaixo).	Fonte: O autor.....	177
Figura 63. Relação de Proximidade Física entre os edifícios e os serviços do bairro, antes (acima) e após otimização (abaixo) para inserção de novos serviços em cada categoria.	Fonte: O autor.....	178
Figura 64. Distribuição de áreas residenciais (em verde) e não residenciais (em magenta), antes (acima) e após (abaixo) implementação de CityMetrics para avaliação de cenários e sugestão de modificações. As ocupações propostas proporcionam um Mixed-Use index mais equilibrado, sugerindo um bairro com maior diversidade.	Fonte: O autor. ....	179

Figura 65. Estudo de alturas e de densidades após implementação de CityMetrics para avaliação de cenários. As ocupações propostas para o bairro proporcionam indicadores de densidade mais elevados e mais compatíveis com a lógica do DOT. Fonte: O autor. ....	180
Figura 66. Gráficos ilustrando diferentes índices relacionados à caminhabilidade antes (em preto) e após (em vermelho) o experimento. Fonte: O autor. ....	183
Figura 67. Sequência de etapas do experimento referente ao ensaio preliminar 4. As ferramentas introduzidas neste experimento permitiram um novo arranjo das etapas e dos resultados do ensaio preliminar em questão. Fonte: O autor. ....	184
Figura 68. Descrição detalhada do experimento referente ao ensaio preliminar 4. Fonte: O autor. ..	185
Figura 69. Distribuição de áreas residenciais (verde) e não residenciais (magenta), antes (acima) e após (abaixo) implementação de CityMetrics, para avaliação de cenários e sugestão de modificações. As ocupações dos terrenos disponíveis foram propostas proporcionalmente à integração dos lotes, visando a ocupações maiores em áreas mais integradas e proporcionar um Mixed-Use index mais equilibrado, sugerindo um bairro com maior diversidade. Fonte: O autor. ....	187
Figura 70. Estudo de alturas e de densidades após implementação de CityMetrics para avaliação de cenários. As ocupações propostas para o bairro proporcionam indicadores de densidade mais elevados e mais compatíveis com a lógica do DOT. Fonte: O autor. ....	188
Figura 71. Relação de Proximidade Física entre os edifícios do bairro e a estação (em azul), cuja localização foi indicada por meio de otimização. Neste ensaio preliminar, foram atribuídos pesos (área total construída) para cada lote no cálculo da média ponderada. Assim, buscou-se priorizar a proximidade para locais com potencial para abrigar (habitando ou trabalhando) mais pessoas. Fonte: O autor. ....	189
Figura 72. Interface do processo de otimização do posicionamento dos novos serviços. Diferentes eixos ilustrando as diferentes funções-objetivo adotadas e os pontos que representam as soluções de Pareto. Em amarelo, a solução adotada para desenvolvimento. Fonte: O autor. ....	189
Figura 73. Localização dos serviços existentes no bairro (acima) e a localização proposta para inserção de novos serviços, após otimização (abaixo). Fonte: O autor. ....	190
Figura 74. Relação de Proximidade Física entre os edifícios e os serviços do bairro, antes (acima) e após otimização (abaixo) para inserção de novos serviços em cada categoria. Fonte: O autor. ....	191

Figura 75. Gráficos ilustrando diferentes índices relacionados à caminhabilidade antes e após o experimento. Detalhe para os índices de Proximidade Topológica, que indicam melhor desempenho na medida em que diminuem, diferentemente dos índices relacionados à Proximidade Física. Fonte: O autor. ....	195
Figura 76. Gráficos ilustrando os resultados do ensaio preliminar 1 (em preto) e do ensaio preliminar 2 (em vermelho). O ensaio preliminar 2 apresenta uma configuração com número consideravelmente menor de lotes e quadras, fornecendo maior área, implicando em um maior potencial construtivo e um melhor aproveitamento de infraestrutura, sem comprometer os índices relacionados à acessibilidade ao transporte e caminhabilidade. A solução do ensaio preliminar 2 também apresenta maior cobertura (GSI) e intensidade (FSI). Fonte: o autor.....	199
Figura 77. Gráfico ilustrando a comparação de resultados entre o ensaio preliminar 2 (em preto) e o ensaio preliminar 3 (em vermelho). Elevados índices de Proximidade Física relacionados à acessibilidade ao transporte e à caminhabilidade em ambas situações. Fonte: O autor.....	201
Figura 78. Gráfico ilustrando a comparação de resultados entre o ensaio preliminar 3 (em preto) e o ensaio preliminar 4 (em vermelho). Elevados índices de Proximidade Física relacionados à acessibilidade ao transporte e à caminhabilidade em ambas situações. Índices de Proximidade Topológica significativamente melhores (mais baixos) no ensaio preliminar 4. Fonte: O autor. ....	203
Figura 79. Dados sobre os participantes dos workshops. Fonte: O autor.....	210
Figura 80. Registros dos workshops realizados. Fonte: O autor.....	210
Figura 81. Visualização de parte dos arquivos disponibilizados para os participantes do workshop. Houve ainda uma discussão inicial sobre o bairro em si e sobre as percepções dos participantes sobre possíveis soluções para as tarefas a serem executadas. Fonte: O autor. ....	213
Figura 82. Exemplo de questionário SEQ utilizado. Fonte: O autor. ....	215
Figura 83. Gráficos ilustrando os resultados dos SEQs do teste de usabilidade. Fonte: O autor.....	218

INTRODUÇÃO

Desempenho:

*s. m.*

Conjunto de características que permitem determinar o grau de eficiência e as possibilidades de operação de um determinado objeto ou artefato

**Dicionário Michaelis**

Esta tese visa a explorar o potencial da associação entre métricas de avaliação de desempenho e recursos computacionais, por meio da elaboração e implementação de um sistema<sup>1</sup> de recomendação e suporte a processos de projeto urbano<sup>2</sup>, denominado, no contexto desta investigação, como CityMetrics<sup>3</sup>. O conteúdo desta pesquisa centra-se, portanto, no desenvolvimento de instrumentos de suporte à tomada de decisão que associem métricas de avaliação de desempenho a recursos computacionais para a análise e a otimização<sup>4</sup> de configurações urbanas. Para efeito desta investigação, são considerados como configurações urbanas os seguintes arranjos formais (geométricos e algébricos) do espaço urbano, relacionados a organização de bairros e cidades sob a perspectiva da mobilidade urbana e do uso do solo: o desenho de ruas, quadras, lotes e edifícios; a distribuição, a variedade e a localização de serviços

---

<sup>1</sup> De acordo com o dicionário Michaelis, o termo “sistema” pode se referir a um “conjunto de elementos distintos, com características e funções específicas, organizadas de forma natural ou por meios artificiais”. Portanto, no âmbito desta investigação, este termo se refere a um conjunto de estratégias, procedimentos, ferramentas e etapas especificamente articulados para auxiliar em tarefas de análise e a otimização de desempenho de configurações formais de áreas urbanas.

<sup>2</sup> No contexto desta tese, o termo “projeto urbano” está empregado em um contexto mais amplo, de maneira a se referir tanto à ideia de planejamento das cidades em si, quanto a situações mais específicas do projeto e do desenho urbano.

<sup>3</sup> Esta nomenclatura deriva do conceito que sustenta o sistema elaborado: a implementação de um conjunto de atributos mensuráveis (ou métricas) enquanto parâmetros que possibilitem mensurar o desempenho de configurações de áreas urbanas. A aplicação destas métricas enquanto parâmetros origina também o jogo de palavras “(para)métrico” do subtítulo desta tese. O termo em inglês objetiva reforçar o enquadramento internacional do contexto desta investigação, bem como facilitar a divulgação e assimilação desta neste mesmo contexto.

<sup>4</sup> Nesta tese, otimização matemática, ou simplesmente otimização, se refere à utilização de modelos computacionais para a resolução de um determinado problema, por meio da procura pela melhor solução (ou solução ótima) entre as alternativas possíveis de um sistema (TEDESCHI, 2014). Este assunto será mais profundamente abordado no Capítulo 3.

urbanos e suas respectivas distâncias para as demais localidades de um bairro; a articulação e a proporção entre áreas residenciais e não residenciais deste mesmo bairro; atributos diretamente relacionados à densidade, como indicadores de aproveitamento construtivo e de ocupação do solo.

A presente introdução apresenta uma visão geral sobre o tema de investigação e a estrutura desta tese. Primeiramente é exposto o enquadramento que permite caracterizar as bases desta pesquisa. Em seguida são apresentadas as questões, os objetivos de pesquisa e os procedimentos metodológicos empregados nesta investigação. Esta Introdução se encerra com uma exposição da estrutura de organização desta tese.

### *Âmbito*

As tentativas de compreender e controlar o desenvolvimento urbano através da indexação de propriedades físicas e do desempenho da forma urbana por meio de variáveis mensuráveis são tão antigas quanto a história do urbanismo como ciência (CIAUD, 2016). Em contrapartida, de uma maneira geral, a aplicação de sistemas matemáticos enquanto mecanismos para a análise e o aperfeiçoamento de configurações urbanas vem sendo estudada e proposta por diversos autores. Dantzig & Saaty (1973) defenderam a utilização de modelos matemáticos para avaliar melhorias no desenvolvimento urbano por meio da otimização de infraestruturas em bairros de alta densidade, ao passo que Salingaros (2010) explorou possibilidades de gerar morfologias urbanas a partir da aplicação de legislação urbanística como código generativo.

Mais especificamente, Duarte et al (2012)<sup>5</sup> propuseram a utilização de modelos computacionais para a formulação, geração e avaliação de planos urbanos. Neste contexto, identificam-se os trabalhos de: Beirão (2012), que desenvolveu um conjunto de ferramentas para gerar soluções alternativas para contextos urbanos, por meio da utilização de um conjunto de padrões e da codificação de tarefas típicas de projeto, e; Montenegro (2015), que elaborou uma ferramenta informática que permite a identificação e a classificação de dados geoespaciais e a localização

---

<sup>5</sup> O projeto de investigação intitulado *City Induction*, liderado pelo professor José Pinto Duarte da Faculdade de Arquitetura da Universidade de Lisboa e vinculado ao laboratório *Living Labs* (MIT *Living Labs*) do *Massachusetts Institute of Technology* (MIT) e ao Centro de Investigação em Arquitetura, Urbanismo e Design (CIAUD) da Universidade de Lisboa, objetiva o desenvolvimento de sistemas e ferramentas computacionais com capacidade para simular sistemas complexos urbanos e comportamentos humanos, de maneira a permitir uma alternativa mais ágil da organização espacial, acomodando de forma mais eficaz a flexibilidade e a economia de recursos. *City Induction* possui ainda como desdobramentos as pesquisas de doutoramento de Beirão (2012), Montenegro (2015) e Gil (2016).

automática de um conjunto de equipamentos públicos coletivos. Paralelamente, mas ainda neste âmbito, Nourian et al (2015) conceberam um conjunto de ferramentas computacionais para análises relativas à caminhabilidade de áreas urbanas.

Os trabalhos supracitados possuem em comum o fato de se apresentarem sob a forma de abordagens que pressupõem a associação de ferramentas computacionais para seu pleno funcionamento. Esse aspecto é o principal elo entre os modelos acima descritos e o que se busca elaborar nesta investigação, que apresenta, ainda, a peculiaridade de possibilitar implementar parametricamente métricas de avaliação de desempenho em tarefas de análise e otimização de configurações geométricas urbanas, visando a tornar estas tarefas mais dinâmicas.

Neste cenário, o campo de ação desta investigação refere-se a um contexto de interseção entre recursos computacionais - mais especificamente aqueles que concernem à lógica algorítmico-paramétrica<sup>6</sup> - e a implementação de atributos mensuráveis (ou métricas) relacionados ao desempenho de configurações urbanas, visando a contribuir para o desenvolvimento de métodos de análise e otimização que forneçam suporte à tomada de decisão em tarefas de projeto urbano.

---

<sup>6</sup> Esta investigação refere-se à lógica algorítmico-paramétrica enquanto aquela que objetiva o uso de programação e de procedimentos algorítmicos e paramétricos em atividades criativas (o Capítulo 2 apresenta argumentações e reflexões mais aprofundadas sobre a questão). Assim, dentre os diversos recursos informáticos existentes para suporte a tarefas de projeto e de planejamento urbano, esta investigação possui particular interesse naqueles que permitem a programação, a alteração, a combinação e o compartilhamento de códigos para gerenciar dados e realizar diferentes operações, de maneira a fornecer suporte a diversas tarefas de planejamento. Ou seja, no contexto desta tese, o termo “lógica algorítmico-paramétrica” se refere, de uma forma simplificada, à utilização de recursos de programação para a elaboração e a customização de ferramentas específicas, desenvolvidas em plataformas de modelagem algorítmica, como é o caso do *plugin* Grasshopper®, integrado à plataforma do *software* de modelagem Rhinoceros®, e que será alvo de mais especificações no Capítulo 3.

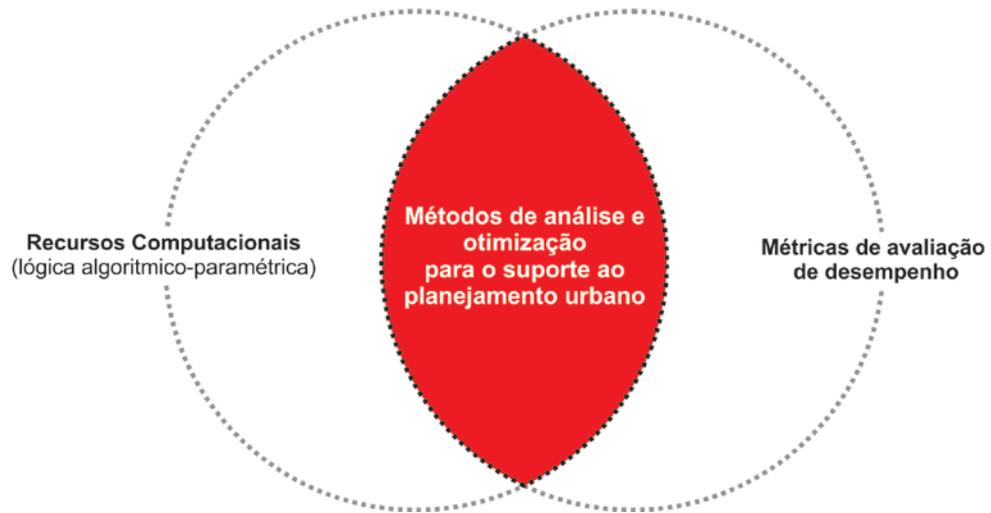


Figura 1. Diagrama de síntese do âmbito desta pesquisa. Fonte: O autor.

### *Enquadramento*

Em um primeiro momento, o entendimento sobre as cidades e os seus fenômenos foram pautados por um pensamento de simplicidade elementar, em uma lógica que se aproxima da noção de causa e efeito (JACOBS, 2011, p.483-486). Paralelamente, o desenvolvimento de recursos matemáticos como suporte a tarefas de planejamento, como a estatística, a probabilidade e a computação, por exemplo, passaram a permitir que problemas urbanos pudessem ser entendidos sob uma perspectiva de complexidade, em abordagens que procuram compreender o todo por meio das relações existentes entre os diversos fatores que o determinam. A este respeito, Limena (2001, p.37) pontua que “as crises urbanas não podem ser pensadas como resultado de um processo linear ou determinado, mas como um processo complexo, que requer uma visão macroscópica capaz de identificar seus atributos, suas tendências, contratendências, determinações e indeterminações”.

Neste sentido, Beirão (2012, p.71, tradução nossa) afirma que o projeto urbano “envolve questões que são demasiadamente complexas para serem tratadas como tarefas lineares”, enquanto Duarte et al (2012, p.80, tradução nossa) expõem que “desenvolvimentos recentes em teorias de projeto urbano apontam para práticas de projeto flexível para aumentar a operacionalidade do planejamento urbano”.

Duarte et al (2012), Beirão (2012), Montenegro (2015), Nourian et al (2015) e Gil (2016) demonstram que recursos computacionais podem contribuir significativamente no suporte a processos de projeto urbano, ao proporcionarem um controle dinâmico (intervenção, atualização e avaliação de modificações) das partes componentes de um sistema complexo, como é o caso

das cidades. A este respeito, Montenegro (2015, p.39) acrescenta que o planejamento urbano “incorpora um número elevado de regras e códigos que são essencialmente algorítmicos”. Ou seja, sistemas computacionais associados ao planejamento das cidades “podem desempenhar, neste conjunto particularmente complexo, um papel importante na resolução do problema urbano” (MONTENEGRO, 2015, p.39).

No entanto, de um modo geral, observa-se que métodos computacionais<sup>7</sup> têm sido mais frequentemente incorporados ao campo específico da arquitetura. Steinø (2010), Gil et al (2010) e Duarte et al (2012) afirmam que aplicações computacionais no campo do urbanismo, apesar de crescentes, ainda se encontram ou em menor quantidade, ou não tão desenvolvidas quanto aquelas restritas ao campo da arquitetura. Não obstante, ferramentas computacionais podem ser implementadas como instrumentos de recomendação e suporte à tomada de decisão em tarefas de planejamento que requeiram a utilização de dados objetivos e mensuráveis, tendo em vista a potencialidade de sistemas computacionais em: a) gerenciar grandes quantidades de informações; b) realizar de maneira mais dinâmica, rápida e eficiente que os meios tradicionais, diferentes operações matemáticas (algébricas e geométricas) e tarefas repetitivas; c) aplicar algoritmos para gerar diferentes alternativas de composição e interações entre elementos dados, e; d) aplicar métricas de mensuração e análise para avaliar desempenhos de sistemas mais ou menos específicos.

---

<sup>7</sup> É importante reforçar que a implementação computacional, apesar de estar diretamente relacionada ao uso do computador, não necessariamente requer a utilização do mesmo, podendo ser implementada manualmente, por exemplo. Entretanto, no contexto desta tese, o termo “computacional” está empregado no sentido de se referir a práticas que utilizem o computador.

Diante disto, se credenciam como casos potenciais para implementação computacional abordagens, métodos e/ou modelos de planejamento urbano que considerem variáveis quantificáveis ou que se baseiem ou demandem parâmetros objetivos para avaliação de desempenho, por exemplo. Neste contexto, é possível identificar o Desenvolvimento Orientado pelo Transporte<sup>8</sup>, um modelo de desenvolvimento urbano que preconiza uma lógica de organização de bairros e cidades mais autônoma e sustentável, com menor dependência do automóvel, menores emissões de carbono e maior interação social.

- **Desenvolvimento Orientado pelo Transporte (DOT)**

O DOT se tornou um dos principais paradigmas de planejamento destinados à criação de bairros compactos, caminháveis e de uso misto, organizados em torno de estações de transporte. Este modelo de organização de configurações urbanas - cujas bases foram propostas por Calthorpe (1993) - incentiva a criação de comunidades que não dependem exclusivamente do automóvel para os deslocamentos diários e está sendo crescentemente promovido em várias cidades do mundo como exemplo de uma prática mais sustentável para a organização de bairros e centros urbanos (FARR, 2012); (LEITE, 2012); (SUZUKI et al, 2013); (VALE, 2015).

Embora não exista uma definição consensual para o DOT, este modelo é usualmente descrito de uma maneira física: uma área compacta com edifícios de uso misto, que conecta serviços e

---

<sup>8</sup> O Desenvolvimento Orientado pelo Transporte será abordado nesta seção de maneira simplificada. Este assunto será mais profundamente desenvolvido, com recurso a mais referências, figuras e esquemas explicativos, no Capítulo 1.

residências por meio de distâncias caminháveis e é servida por uma rede de mobilidade multimodal (VALE, 2015). Nesta lógica, as necessidades urbanas básicas são facilmente acessíveis sem exigir o recurso a veículos motorizados ou dispendar grandes quantidades de tempo de deslocamento, suportando bairros mais autônomos e sustentáveis (SUZUKI ET AL, 2013).

O DOT visa a territórios compactos e multifuncionais, onde os deslocamentos ocorram a pé ou de bicicleta, ou ainda, suportados por uma rede de transportes coletivos. Sendo assim, são princípios básicos mensuráveis do DOT: a) a acessibilidade ao transporte - a localização de serviços, comércio e habitação em torno de estações de transporte, proporcionando curtas distâncias para o acesso ao transporte coletivo; b) a caminhabilidade - a capacidade que uma determinada localidade possui de conectar habitações e diversos serviços urbanos por meio de distâncias que podem ser percorridas a pé, conferindo maior vitalidade às ruas e ao bairro como um todo; c) a diversidade - variedade de usos e funções dentro de um mesmo distrito, proporcionando maior autonomia para os bairros, e; d) a compacidade - alta ocupação populacional dentro dos bairros, de maneira compacta e permitindo suportar diferentes modais (CERVERO & KOCKELMAN, 1997; CALTHORPE & FULTON, 2001; DITTMAR & OHLAND, 2004; SUZUKI ET AL, 2013).

Estes princípios básicos do DOT<sup>9</sup> podem ser aferidos por meio de diversas métricas, que consideram atributos geométricos, algébricos e mensuráveis. Entre estas métricas estão: a) o

---

<sup>9</sup> Estes princípios também serão devidamente examinados e analisados no Capítulo 1, inclusive com descrições mais aprofundadas das referências das diferentes métricas que permitem suas respectivas mensurações.

posicionamento e a quantificação de lotes, edifícios, serviços e demais funções urbanas; b) as distâncias físicas e topológicas<sup>10</sup> entre determinados pontos de interesse (entre uma residência e um serviço urbano, por exemplo); c) índices que mensuram a relação entre áreas residenciais e não residenciais de uma determinada localidade (diversidade) e; d) indicadores relativos a densidade de um lote, quadra, bairro ou cidade.

Estas métricas podem ser diretamente relacionadas a entidades geométrico-matemáticas como coordenadas, números, pontos, curvas, polígonos e sólidos, por exemplo. Deste modo, podem ser introduzidas como parâmetros para a realização de operações lógicas, regras projetuais, tarefas de simulação, retroalimentação e avaliação, possibilitando gerar diferentes alternativas para uma determinada situação urbanística.

Além disso, apesar desta relação direta entre estas métricas e o contexto computacional, ainda não foram suficientemente exploradas soluções que utilizem aplicações informáticas para otimizar as configurações e (consequentemente) o desempenho de áreas urbanas em tarefas de simulação, análise e suporte à tomada de decisão em planejamentos para o DOT - ou em processos de natureza semelhante. Segundo diversos autores, há demanda por métodos ou sistemas que auxiliem os atores envolvidos na discussão, proposição e/ou avaliação de projetos baseados na lógica do DOT a serem implementados de maneira mais bem-sucedida (DITTMAR & POTICHA, 2004); (LEITE, 2012); (SUZUKI et al, 2013); (VALE, 2015).

---

<sup>10</sup> Os conceitos de distâncias físicas e topológicas empregados nesta tese, serão mais profundamente explicados nos Capítulos 1 e 3.

Em outras palavras, o DOT se baseia em alguns parâmetros essencialmente mensuráveis para estruturar as configurações e melhorar o desempenho de bairros e centros urbanos. Isto é, o DOT representa um tipo de proposição complexa, derivada de algumas variáveis consideradas cruciais para seus objetivos, o que o credencia como um caso potencial para implementação computacional (LIMA et al, 2016a).

Diante disto, o DOT, com a sua lógica e objetivos centrados na resolução de questões voltadas à mobilidade urbana e ao uso do solo por meio de princípios em grande parte quantificáveis, constitui uma base teórica e prática com inúmeras possibilidades para exploração. Por essa razão, as bases do DOT foram adotadas como objeto de estudo para a elaboração do sistema relativo a esta investigação.

Entretanto, apesar desta investigação utilizar o DOT (e mais especificamente seus princípios) como ponto de partida para a elaboração de um sistema, verifica-se a potencialidade das métricas adotadas serem implementadas em contextos semelhantes que extrapolem o âmbito do DOT. Desta maneira, pretende-se que o sistema proposto possa balizar a implementação de outras métricas (e ferramentas) em situações diversas de projeto urbano.

### *Questões*

Em um aspecto mais amplo e sob a perspectiva do cenário apresentado, o cerne desta investigação pode ser sintetizado por meio da seguinte questão: Como atributos objetivamente quantificáveis (métricas de avaliação) podem ser associados a instrumentos eminentemente objetivos e matemáticos como os da lógica algorítmico-paramétrica, de maneira a constituir um sistema de suporte à tomada de decisão em uma área do conhecimento tão abrangente, complexa e heurística como a do planejamento urbano, para a análise e a proposição de configurações urbanas que visem a bairros e cidades com melhor desempenho?

Desta questão central, outras questões podem ser suscitadas, tais como: Quais podem ser as contribuições decorrentes da implementação da lógica algorítmico-paramétrica em tarefas de planejamento voltadas para a análise e otimização de configurações urbanas? Como ferramentas computacionais e de programação podem ser aplicadas para simular, avaliar e indicar soluções otimizadas de arranjo para bairros e cidades, com base em princípios que possam ser mensurados por métricas de avaliação, como é o caso do DOT? Quais métricas podem ser adotadas para subsidiar os instrumentos propostos? Quais conceitos e recursos algorítmico-paramétricos podem ser incorporados a um sistema de análise e proposição baseada em atributos mensuráveis, na procura por novas estratégias e/ou instrumentos de planejamento para bairros e cidades com melhor desempenho, ou no contexto específico do DOT, mais autônomas e sustentáveis?

## *Objetivos*

### Objetivo geral

O objetivo geral desta tese é o de contribuir para a discussão sobre os processos de projeto do espaço urbano, sob o ponto de vista da implementação de recursos computacionais, mais especificamente daqueles relacionados à lógica algorítmico-paramétrica. Há, no escopo do projeto urbano, questões de temporalidade, precisão, limites e incompletudes (entre outras, como agentes envolvidos) que tornam a natureza do projetar urbanístico substancialmente diferente daquela relativa ao desenvolvimento de um objeto arquitetônico isolado, por exemplo. Neste sentido, processos de projeto urbano podem ser beneficiados por métodos (e mesmo ferramentas) computacionais especificamente elaborados para sua potencialização.

### Objetivos específicos

O objetivo específico desta investigação é a elaboração de um sistema de suporte à tomada de decisão no processo de projetos urbanos, por meio da incorporação e da programação de ferramentas computacionais que associem métricas de avaliação de desempenho de configurações urbanas a operações lógico-matemáticas. Este sistema deve ser capaz de incorporar um conjunto de variáveis e de dar visibilidade formal-espacial a elas em tempo real (ou em tempo suficiente para funcionar como retroalimentação no processo de projeto, seja por projetistas, seja por outros atores envolvidos). Pretende-se assim, articular aspectos relativos à

implementação algorítmico-paramétrica no contexto urbano a referências de métricas que possibilitem mensurar fatores relacionados ao desempenho de configurações urbanas, dentro do contexto apresentado. Neste sentido, esta tese também possui como objetivos específicos: a) apontar referências de cálculo de desempenho que permitam a construção computacional de métricas para a avaliação e a otimização de configurações urbanas, sob a perspectiva de princípios mensuráveis; b) identificar funcionalidades, estratégias e instrumentos relativos à lógica algorítmico-paramétrica que possam contribuir para o desenvolvimento de um sistema de suporte a processos de projeto urbano, dentro do recorte apresentado anteriormente, e; c) desenvolver um conjunto de ferramentas computacionais que associem as funcionalidades, estratégias e instrumentos identificados às referências de cálculo de desempenho apontadas, de maneira a materializar a implementação de métricas de avaliação de desempenho em tarefas de análise e otimização de configurações urbanas.

### *Procedimentos metodológicos*

Para a elaboração do sistema desenvolvido no contexto desta tese, são necessários conhecimentos sobre recursos algorítmicos e de programação, bem como sobre trabalhos que possam constituir aporte teórico e metodológico para: a) a definição de princípios e métricas referentes ao desempenho no planejamento urbano, e; b) a formulação de uma contextualização computacional teórica e prática, em seus princípios, recursos e estratégias a serem abordadas.

Diante do exposto, esta investigação se desenvolve por meio das seguintes etapas:

- **Construção de quadro teórico-conceitual:** fase em que se elabora pesquisa bibliográfica para a definição dos conceitos, princípios e métodos adotados, de maneira a estabelecer a fundamentação teórica para desenvolvimento do sistema proposto. Nesta etapa são abordados trabalhos que se referem a: a) o DOT e seus princípios, como: Calthorpe (1993), Dittmar & Ohland (2004), Leite (2012), Farr (2013), Suzuki et al (2013), e Vale (2015), e; b) modelos computacionais e problemas urbanos, mais especificamente os trabalhos de Duarte et al (2012), Beirão (2012), Montenegro (2015) e Nourian et al (2015).
- **Construção de repertório computacional:** fase de aquisição de conhecimentos técnicos e práticos de programação, de experimentação e avaliação de diferentes ferramentas e modelos computacionais aplicáveis ao contexto do planejamento urbano. Nesta fase se dá a busca e a experimentação de *software* e *plugins*, de maneira a identificar recursos que possam contribuir para o desenvolvimento desta investigação;
- **Elaboração do sistema proposto:** etapa em que se dá o cruzamento dos conhecimentos teóricos e práticos obtidos, bem como da interseção entre planejamento urbano e

práticas computacionais. Desta fase resulta a proposição, o desenvolvimento e a experimentação do sistema e das ferramentas propostas nesta investigação;

- **Ensaio preliminar:** Nesta fase são elaborados estudos que se baseiam na aplicação de CityMetrics em casos práticos, de maneira a avaliar a versatilidade e a eficiência do sistema proposto em abordagens de diferentes naturezas;
- **Testes com usuários:** Fase em que CityMetrics é submetido a utilização por parte de usuários de diferentes contextos da área de computação, planejamento urbano e arquitetura. Estes usuários foram observados diretamente e responderam a questionários para uma avaliação sumária do sistema.

### *Organização desta tese*

Esta tese está estruturada em cinco capítulos, aos quais são acrescentados a Introdução e a seção intitulada Conclusão e Contribuições. A organização escolhida pretende refletir a natureza teórico-prática desta investigação, que se desenvolve por meio da elaboração de um sistema que associa métricas de análise e otimização de desempenho a instrumentos algorítmico-paramétricos, para suporte à tomada de decisão em processos de projeto urbano.

Assim, no Capítulo 1, será apresentada uma revisão de literatura sobre o DOT, de maneira a caracterizá-lo, explicitar como ele se insere no contexto desta investigação e reforçar sua importância para o desenvolvimento desta pesquisa: serão apresentados conceitos e definições, escopo, vantagens, limitações, relevância, tipologias e princípios mensuráveis deste modelo de desenvolvimento urbano. Neste capítulo, serão ainda apontadas referências de cálculo que permitam identificar métricas para avaliação e otimização de desempenho de configurações urbanas, sob a perspectiva de princípios mensuráveis do DOT.

No Capítulo 2, será desenvolvido um enquadramento sobre a aplicação de modelos computacionais voltados a processos de projeto urbano, visando a posicionar esta investigação no contexto das pesquisas já desenvolvidas nesta área. Para tal, será elaborada uma contextualização sobre recursos computacionais no contexto urbanístico, bem como uma revisão de modelos aplicados e uma identificação de funcionalidades que possam ser incorporadas ao sistema e a às ferramentas a serem apresentadas nesta tese.

No Capítulo 3, serão expostas as bases que sustentam o cerne desta investigação: a apresentação da designação, das estratégias e do conceito de CityMetrics, um sistema elaborado para análise

e otimização de configurações urbanas, por meio da associação de ferramentas algorítmicas e métricas de avaliação de desempenho. Neste capítulo estarão detalhadamente descritas as métricas implementadas e as ferramentas propostas, bem como estarão explicitadas suas respectivas lógicas de funcionamento.

Em sequência, no Capítulo 4, será demonstrado e analisado o potencial de utilização de CityMetrics em diferentes situações de projeto, em um conjunto de ensaios preliminares que abordam contextos diversos para avaliação da versatilidade e da eficiência do sistema proposto, apresentando e analisando os dados e resultados obtidos.

No Capítulo 5, será descrita uma avaliação sumária de CityMetrics, por meio de *workshops* em que participantes de diferentes níveis de formação acadêmica e experiência profissional utilizam o sistema e as ferramentas desenvolvidas em tarefas de natureza prática, permitindo assim recolher dados decorrentes da utilização de CityMetrics em um contexto real e fornecendo subsídios para uma melhor compreensão acerca dos diversos níveis de sua funcionalidade (e. g. facilidade de uso, utilidade, desempenho das ferramentas e atendimento das ferramentas aos objetivos estipulados).

Ao final de cada capítulo serão apresentadas reflexões que servirão de subsídio para a elaboração da conclusão da tese. Nesta conclusão se dará a articulação das informações apontadas nos capítulos anteriores, visando a reiterar a originalidade e a contribuição desta tese para a sua área.



“And my radio says tonight it's gonna freeze  
People driving home from the factories  
There's six lanes of traffic  
Three lanes moving slow”

**Telegraph Road – Dire Straits**

Este capítulo expõe uma visão geral sobre o Desenvolvimento Orientado pelo Transporte (DOT), o modelo de desenvolvimento urbano por meio do qual será verificado o potencial da utilização de métricas de avaliação de desempenho enquanto referência para a análise e a otimização de configurações urbanas. Isto é: as bases do DOT foram adotadas como ponto de partida para a elaboração do sistema que se objetiva nesta investigação. Assim, primeiramente, é apresentado o contexto no qual o DOT se enquadra. Em sequência, são articulados diversos conceitos e definições sobre ele e são identificadas suas vantagens, limitações, relevância e tipologias. Finalmente, são apontados os princípios estruturadores do DOT, suas características mensuráveis e respectivas referências para cálculo – que permitem identificar métricas de avaliação de desempenho.

### *1.1. Contextualização*

A *Global Fuel Economy* (2016) afirma que a queima de combustíveis fósseis em veículos motorizados é responsável por até 75 por cento da poluição do ar urbano que, por sua vez, tem sido associada a 3,7 milhões de mortes prematuras em 2012 (Organização Mundial da Saúde, 2015). Para além de contribuir para as emissões de carbono, o paradigma de organização e expansão das cidades tem sido responsável por grandes inconvenientes nos centros urbanos contemporâneos (e. g. dependência do automóvel, padrões espaciais fragmentados, menor interação social).

Rogers (1997) acrescenta que o modelo de desenvolvimento das cidades contemporâneas não tem considerado a fragilidade dos ecossistemas, o que evidencia seu caráter predominantemente expansionista, em detrimento de fatores relacionados a sustentabilidade dos centros urbanos. Este padrão de desenvolvimento adotado se encontra ligado, historicamente, à ideia de “modernização”, ainda que para tal negligencie princípios relativos à qualidade de vida. Para Rogers (1997), as cidades constituíram-se em um grande agente destruidor dos ecossistemas.

Neste contexto, Rogers (1997) afirma ainda que os espaços públicos das cidades contemporâneas foram negligenciados nas últimas décadas. As ruas, ao invés de abrigarem encontros e atividades sociais cotidianas, passaram a ser o palco de estacionamento e

congestionamentos de veículos, afetando diretamente o nível de urbanidade<sup>11</sup> nos centros urbanos contemporâneos.

Para Gehl (2013), a dimensão humana tem sido um tópico do planejamento urbano negligenciado em detrimento de várias outras questões que possuem mais força, como por exemplo, a preocupação com a acomodação do vertiginoso aumento do tráfego de automóveis. As linhas de pensamento dominantes no planejamento urbano atual “deram baixa prioridade ao espaço público, às áreas de pedestres e ao papel do espaço urbano como local de encontro dos moradores da cidade” (GEHL, 2013, p. 3).

Para Gehl (2013, p. 118), “as cidades devem proporcionar boas condições para que as pessoas caminhem, parem, sentem-se, olhem, ouçam e falem”. Neste cenário, as cidades contemporâneas, predominantemente organizadas de acordo com uma lógica baseada nos usos, segrega áreas residenciais e comerciais “obrigando o deslocamento diário da população em longas distâncias, confinando a vida urbana ao interior solitário dos automóveis” (STUCHI & LEITE, 2015, p.28).

---

<sup>11</sup> O conceito de urbanidade, aqui empregado, se refere ao modo como espaços da cidade acolhem as pessoas e à maneira com estas se relacionam nos espaços da cidade (LEITE, 2012).



Figura 2. Eastshore Freeway, na Califórnia, e o paradigma de desenvolvimento das cidades contemporâneas: automóveis e congestionamento, edifícios e bairros monofuncionais. Fonte: Wikipédia (2015)

A necessidade de novas abordagens de projeto e planejamento urbano, por meio das quais não sejam criados espaços segregados para fins comerciais, industriais, educacionais, entre outros, é reforçada por Rogers (1997). A interação espacial de diferentes atividades em uma mesma vizinhança (ver Figura 3) possui a capacidade de recompor a trama da cidade e, neste quadro, a sustentabilidade urbana pode se beneficiar do desenvolvimento tecnológico.

O conceito de cidade sustentável reconhece que a cidade precisa atender aos nossos objetivos sociais, ambientais, políticos e culturais, bem como aos objetivos econômicos e físicos. É um organismo dinâmico tão complexo quanto a própria sociedade e suficientemente ágil para reagir rapidamente às suas mudanças. (ROGERS, 1997, p.167)



Figura 3. Proposta de intervenção urbana em Edmonton, Canadá. Transporte coletivo, diversidade e urbanidade em um conceito de desenvolvimento urbano voltado para as pessoas. Fonte: *Smart Growth* (2015)

A questão da sustentabilidade nos centros urbanos tem sido alvo de crescente interesse. Este fato pode ser explicado ao considerarmos alguns dados, apontados por Rogers (1997) e Leite (2012): a) dois terços do consumo mundial de energia advêm das cidades; b) 75 por cento dos resíduos são gerados nas cidades; c) a finitude dos combustíveis fósseis; d) as altas emissões de carbono nos centros urbanos; e) o esgotamento de recursos hídricos, e; f) os alarmantes níveis de poluição e a conseqüente ameaça ao clima. Rogers (1997) defende ainda que as cidades devem ser pensadas para absorver o crescimento urbano e ainda assim serem autossustentáveis, ou seja: as cidades contemporâneas precisam oferecer oportunidades sem, contudo, colocar em risco as futuras gerações.

O urbanismo sustentável para Farr (2013) é aquele que proporciona possibilidades de deslocamento a pé, integrado com um sistema de transporte público eficiente e somado a edificações e infraestrutura de alto desempenho. Nesta perspectiva, deve-se enfatizar os benefícios sociais e a esfera pessoal na vida do bairro. Farr (2013) identifica três elementos como

cruciais para a sustentabilidade urbana: bairros, distritos e corredores. Nesta lógica, bairros são compactos, respeitam os pedestres e possuem uso misto. Os distritos, assim como os bairros, respeitam o pedestre e são compactos, entretanto, possuem normalmente um uso único – como em um campus ou distrito industrial, por exemplo. Os corredores são aqueles que interligam os bairros e os distritos.

Dentre os muitos benefícios dos bairros bem definidos está uma rede social finita. Os passeios e as quadras pequenas, típicas dos bairros urbanos, estimulam a sociabilidade. O tamanho limitado de um bairro aumenta as chances de uma pessoa ser reconhecida ou de encontrar algum amigo – de ser conhecida. As pessoas aumentam seus círculos de relações por meio do contato cotidiano nas ruas, varandas e outros lugares, e de organizações e atividades locais. Essa maior rede de amigos e conhecidos pode aumentar o bem-estar e o capital social – a vantagem resultante da localização de uma pessoa na estrutura das relações. (FARR, 2013, p.29)

Centros urbanos sustentáveis, sob esta noção, estendem a função do bairro no sentido de atender as necessidades sociais e ambientais da sociedade. O conceito de sustentabilidade social implica em conceder “aos vários grupos da sociedade oportunidades iguais de acesso ao espaço público e também de se movimentar pela cidade” (GEHL, 2013, p.109). Para tal, é necessária a existência de espaços públicos acessíveis, que incentivem encontros organizados ou a troca informal de experiências. “O urbanismo sustentável é simplesmente impossível em baixas densidades, inferiores a uma média de 17,5 ou 20 unidades de habitação por hectare” (FARR, 2013, p.31).

Cidades sustentáveis são, necessariamente, compactas, densas. Como se sabe, maiores densidades urbanas representam menor consumo de energia per capita. Em contraponto ao modelo “beleza americana” de subúrbios espalhados no território com baixíssima densidade, as cidades mais densas da Europa e da Ásia são hoje modelos na importante competição internacional entre as *global green cities*, justamente pelas

suas altas densidades, otimizando as infraestruturas urbanas e propiciando ambientes de maior qualidade de vida promovida pela sobreposição de usos. (LEITE, 2012, p.13)

Neste contexto, é importante ressaltar ainda que a noção de cidade sustentável deve ser compreendida como “muito mais do que um desejável conjunto de construções sustentáveis. Ela deve incorporar parâmetros de sustentabilidade ao desenvolvimento urbano”. (LEITE, 2012, p.133).

Espaços de uso coletivo podem voltar a fazer parte integrante de todas as nossas cidades e em todo o território, assim como o gradiente verde, as águas e as ciclovias. As construções sustentáveis, verdes, devem ser buscadas continuamente, e isso está ocorrendo de modo cada vez mais profissional e qualificado, mas não é suficiente – a cidade sustentável é muito mais que o conjunto de edifícios verdes. (LEITE, 2012, p.249).

## 1.2. DOT – Conceito e definições, vantagens e limitações, relevância e tipologias

### 1.2.1. Conceito e definições

Peter Calthorpe (1993), em seu livro intitulado *The next american metropolis*, iniciou a articulação de algumas premissas de planejamento urbano sustentável, que posteriormente vieram a constituir as bases do conceito do *Transit Oriented Development*, no original em inglês, ou Desenvolvimento Orientado pelo Transporte<sup>12</sup>, como é comumente traduzido. São elas:

- a) A organização do crescimento a um nível regional, de maneira policêntrica e compacta, e que dê suporte à mobilidade urbana;
- b) O posicionamento de residências, pontos de comércio e emprego, parques e demais usos dentro de uma distância acessível a pé das paradas de trânsito;
- c) A criação de redes de vias que conectem destinos locais e que incentivem a caminhada e o ciclismo;
- d) A promoção de um *mix* de densidades, tipologias e usos;
- e) A preservação do habitat local, zonas ribeirinhas e espaços abertos e de alta qualidade;
- f) A instituição dos espaços públicos como foco para a orientação dos edifícios e das atividades da vizinhança;
- g) O incentivo à ocupação e ao desenvolvimento ao longo de corredores de trânsito e comunidades existentes.

---

<sup>12</sup> Existem ainda outras traduções para o termo “*Transit Oriented Development*”, como Desenvolvimento Orientado pelo Transporte Sustentável (DOTS) ou Desenvolvimento Orientado pelo Trânsito.

Atualmente, embora não exista uma definição consensual para o DOT, ele é frequentemente descrito de uma maneira física: uma área compacta com edifícios de uso misto, que conecte serviços e residências por meio de distâncias caminháveis e servida por uma rede de mobilidade multimodal (Cervero & Kockelman, 1997; Calthorpe & Fulton, 2001; Suzuki et al, 2013; Vale, 2015). Neste modelo, necessidades urbanas básicas são facilmente acessíveis sem exigir automóveis ou despende grandes quantidades de tempo em deslocamentos, suportando bairros mais autônomos e sustentáveis.

Para Stuchi & Leite (2015, p.26), “as tarefas da vida cotidiana deveriam ocorrer num território compacto e multifuncional, onde os deslocamentos fossem poucos e pequenos, ocorrendo a pé ou de bicicleta”. Neste cenário ideal, se estabelece ainda que: “os deslocamentos maiores seriam demandados apenas em situações não típicas (diárias) e deveriam ser suportados por uma rede multimodal integrada de transportes coletivos” (STUCHI & LEITE, 2015, p.26).

Este padrão, que propõe que uma rede integrada de transporte que contemple os mais diversos modais de transporte e que complemente os pequenos deslocamentos diários necessários à vida urbana, sintetiza o conceito de DOT, que Stuchi & Leite (2015) expressam:

Trata-se de uma situação ideal que atende internacionalmente por Desenvolvimento Orientado pelo Transporte, cuja lógica é de alinhar o desenvolvimento do território com o sistema de transportes, estabelecendo estrategicamente no território uma rede de centralidades multifuncionais conectadas por um sistema de transportes eficientes. (STUCHI & LEITE, 2015, p.27).

Stuchi & Leite (2015) ainda definem o DOT como uma estratégia de ocupação, que consiste na “articulação entre a mobilidade e o desenvolvimento urbano, através da orientação do

“crescimento em áreas próximas dos eixos de transporte” (p.182). Entre os principais objetivos do DOT está a constituição de cidades compactas e multifuncionais, com bairros autossuficientes, vias sem congestionamentos e uma rede viária de percursos agradáveis ao pedestre e que estimulem a caminhada, o ciclismo e a utilização de diversos modais de transporte. Esta premissa se relaciona intimamente à ideia do desenvolvimento urbano atrelado a um sistema de mobilidade, que conte com uma rede de transportes coletivos articulada e eficiente.

Stuchi & Leite (2015) acreditam que o desenvolvimento das cidades precisa ser estimulado para acontecer junto a áreas próximas a nós de transporte coletivo. Assim, as distâncias e os deslocamentos dentro do território da cidade são reduzidos e o tempo necessário para vencê-los também. Isto implica na oferta de um sistema de transporte articulado entre vários modais, em uma rede que conecte os diversos bairros do território da cidade. Todo deslocamento urbano começa e termina com uma caminhada. Sob esta perspectiva, fica evidente que a atenção daqueles que pensam a cidade deve estar voltada para o pedestre e seus percursos, com uma rede de vias que incentive deslocamentos a pé. A este respeito, é importante ressaltar que o DOT se apresenta como um dos paradigmas de planejamento fundamentais no sentido de reverter a lógica do desenvolvimento urbano orientado para o automóvel.

Uma organização não governamental norte-americana, a *Reconnecting America* (2016), define o DOT como um modelo de desenvolvimento urbano que propõe a combinação de moradia, comércio e vários serviços urbanos, integrados por meio de distâncias curtas, proporcionando mais opções de habitação e transporte, além de serviços variados que podem ser acessados a pé.

Adotar este modelo de desenvolvimento urbano significa considerar um novo paradigma para o funcionamento e para o próprio metabolismo das cidades. Uma implementação adequada do DOT requer que a estruturação urbana, a lógica de transporte, a configuração das vias, dos passeios e das quadras se deem de maneira diferente do que preconiza o modelo de desenvolvimento urbano comumente adotado. Stuchi & Leite (2015) apontam também que:

Para conseguir a meta de uma cidade articulada e, ao mesmo tempo agradável, deve-se desprestigiar o modelo de desenvolvimento ligado ao automóvel particular, com abertura de grandes sistemas viários, e estimular os usos de transportes alternativos em conjunto com a intensificação do uso e qualificação do transporte coletivo (STUCHI & LEITE, 2015, p.182).

Para Gehl (2013), o DOT é um modelo de desenvolvimento urbano de crescente aceitação em todo o mundo, que compreende a concentração nas “interrelações entre as estruturas para pedestres e ciclistas e a rede coletiva de tráfego” (GEHL, 2013, p.107). Além disso, Gehl (2013) considera uma vantagem o fato de que cidades compactas baseadas no DOT são capazes de oferecer um número suficiente de moradias e locais de trabalho a uma distância caminhável das estações. Estas cidades, com bons espaços públicos e curtas distâncias entre trabalho, serviços e moradias “garantem inúmeras vantagens ambientais como linhas de abastecimento curtas e reduzido consumo de áreas”. (GEHL, 2013, p.107).

Farr (2013), por sua vez, apresenta o DOT como um modelo de organização urbana que proporciona mais opções de habitação e transporte, além de serviços variados que podem ser acessados a pé (priorização dos pedestres e vida urbana). Em paralelo, Dittmar & Poticha (2004) entendem que o DOT visa a maximizar o acesso ao transporte coletivo e não motorizado, por

meio da implantação de estações (de trem ou ônibus) centralmente localizadas e rodeadas por densidade relativamente alta.

É mais fácil atrair e reter os usuários do transporte público em corredores com alta densidade urbana. Simplificando, uma concentração de pessoas que vivem ou trabalham próximas a uma parada de transporte cria um mercado estável de pessoas que percorrem uma distância curta a pé até o serviço de transporte público. A quantificação desta relação entre a densidade populacional em um corredor de transporte público e a sua capacidade de sustentar o transporte é essencial para o urbanismo sustentável (FARR, 2013, p.103).

Ainda segundo Farr (2013), o DOT transcende a ideia de simplesmente se orientar uma unidade de vizinhança próxima a uma estação de transporte público. Trata-se, no entanto, do conceito de um bairro estruturado em torno de uma estação ou ao longo de um corredor de transporte<sup>13</sup>, permeado por empreendimentos múltiplos, usos mistos, e “uma rede viária em que se possa caminhar e um desenho que permita vida urbana e opções de transporte” (FARR, 2013, p.109).

O DOT estimula a utilização do sistema de transporte público ao criar bairros em que se pode ir a pé até as estações e que apresentam urbanização compacta, diversidade no uso do solo e desenho urbano orientado para o pedestre. Em lugares onde a distância entre as habitações e os transportes pode ser percorrida a pé, os moradores utilizam o transporte público com uma frequência cinco vezes maior que aqueles que dirigem até as estações e a participação de outros modais de transporte além do automóvel é substancialmente maior do que em bairros onde todo deslocamento precisa ser feito de automóvel. (FARR, 2013, p.103).

---

<sup>13</sup> Adensamentos em torno de estações diferem de adensamentos ao longo de corredores de transporte. No entanto, os princípios do DOT podem ser aplicados semelhantemente nestes dois casos.

Suzuki et al (2013) consideram o DOT uma abordagem prática para reduzir congestionamento, emissão de gases responsáveis pelo efeito estufa e outros causadores de problemas ambientais, além de proporcionar possibilidades de arranjo e organização espacial urbana que visam a promover maior interação social, melhor uso do solo e conexões entre trabalho, serviços e residências. Ainda segundo Suzuki et al (2013), experiências mostram que a implementação bem-sucedida do DOT não apenas aumenta o uso do transporte coletivo (estimulando usuários a abandonarem os carros e utilizarem ônibus ou trens), mas também serve como instrumento para o desenvolvimento das comunidades e revitalização de bairros deteriorados.

Isso reforça o que diz Calthorpe (2004), quando afirma que o DOT é a combinação de planejamento urbano, revitalização das cidades, rejuvenescimento dos subúrbios e vizinhanças caminháveis. Mais do que diversificar sistemas de transporte, o DOT possui a capacidade de oferecer “uma nova gama de padrões de desenvolvimento para bairros e cidades”. (CALTHORPE, 2004, p.xii, tradução nossa). O DOT pode, neste contexto, ser resumido como uma área de uso misto planejada para maximizar o acesso da população ao transporte público, que se articula por meio de uma estação de transporte rodeada por desenvolvimento de densidade relativamente alta e decrescente de acordo com a distância para a estação. Preferencialmente, esta estrutura se distribui em um raio de escala adequada para os pedestres em seus percursos (DITTMAR & POTICHA, 2004). Assim, o DOT pode, neste contexto, ser compreendido como um “modelo completo” para organização das cidades, ou “uma resposta integral” que visa a configurações urbanas mais autônomas e sustentáveis.

### 1.2.2. Vantagens e limitações

Dentre as vantagens apontadas à adoção do DOT como modelo para estruturação e organização espacial dos centros urbanos, encontram-se: a) a redução da emissão de gases poluentes do ar e de gases relacionados ao efeito estufa; b) a promoção de comunidades caminháveis, que incentivam modos de vida mais saudáveis e menos sedentários; c) a otimização de infraestrutura urbana, uma vez que a expansão da urbanização demanda maiores custos públicos com a provisão e manutenção da infraestrutura e serviços urbanos, e; d) a redução da dependência do automóvel (FARR, 2013; SUZUKI et al 2013; STUCHI & LEITE, 2015; RECONNECTING AMERICA, 2016).

Apesar de todos estes benefícios relacionados, o DOT ainda apresenta algumas limitações que dificultam sua implementação com maior frequência e eficiência. Diversos autores permitem encontrar, basicamente, limitações de quatro ordens a este respeito, são elas: a) de ordem financeira - apesar de reduzir custos com infraestrutura a longo prazo, o DOT demanda grandes investimentos públicos e privados para ser implantado; b) de ordem participativa - resistências da comunidade local representam um desafio para a implementação do DOT. Moradores muitas vezes temem que o DOT possa descaracterizar seu bairro, criar congestionamento de tráfego localizado ou depreciar suas propriedades; c) de ordem legal - a legislação da maioria dos municípios não é favorável à implantação do DOT. Leis de zoneamento e códigos de uso do solo são geralmente concebidos para a lógica de bairros e edifícios monofuncionais, com desenvolvimento orientado aos automóveis. Em alguns casos, parâmetros de zoneamento frequentemente proíbem a densidade necessária, e disposições como valores máximos em relação a taxa de ocupação, limitações de altura e afastamentos dos edifícios, entre outros,

praticamente inviabilizam o DOT, apesar de serem comumente distorcidos por interesses relativos à especulação imobiliária, e; d) de ordem instrumental - ainda não foram suficientemente desenvolvidos instrumentos ou sistemas que auxiliem os atores envolvidos na discussão, proposição e/ou avaliação de projetos, a implementarem de maneira eficiente soluções baseadas na lógica do DOT (DITTMAR & OHLAND, 2004; SUZUKI et al, 2013; STUCHI & LEITE, 2015; RECONNECTING AMERICA, 2016).

### 1.2.3. Relevância

Para Leite (2012), há uma forte demanda atual em promover cidades providas de um metabolismo que gere maior urbanidade, o que Gehl (2013) define como “cidades para as pessoas”. Ogra & Ndebele (2014) afirmam que o DOT assumiu, nos últimos anos, um papel central no contexto das políticas de mobilidade urbana mundial, tornando-se um dos principais paradigmas de planejamento que visa a reverter o desenvolvimento urbano baseado nos deslocamentos por automóvel individual. Em paralelo, Vale (2015) afirma que nas últimas duas décadas, o DOT vem sendo crescentemente promovido em várias cidades do mundo como uma política sustentável para centros urbanos contemporâneos.

Segundo a *Transit Cooperative Research Program* (2004), uma entidade norte-americana voltada para a pesquisa sobre mobilidade urbana, uma grande variedade de DOTs pode ser encontrada nos Estados Unidos e todos os indicadores demonstram que os números e tipos de DOT tendem a aumentar naquele país. Atualmente, existe mais de uma centena de DOTs implementados nos Estados Unidos, em diversas escalas e tipologias. Altoon & Auld (2011) demonstram que

a relevância do DOT não se restringe aos Estados Unidos e apresentam iniciativas de implementação do DOT em diversos países como: Alemanha, Austrália, Bélgica, Canadá, China, França, Holanda, Nova Zelândia, Polônia, Reino Unido, Rússia, entre outros.

No Brasil, a cidade de Nova Friburgo, ao elaborar seu Plano de Desenvolvimento Urbano Estratégico – 2050, estabeleceu princípios do DOT como parte da estratégia central para aproximar as atividades da cidade, qualificar a vida urbana nos bairros, equilibrar as dinâmicas urbanas e alinhar desenvolvimento urbano e mobilidade, ao incentivar a criação de territórios compactos e de redes de centralidades multifuncionais, em “uma rede equilibrada de núcleos densos conectados por adequados sistemas de mobilidade” (STUCHI & LEITE, 2015, p.24). O município de São Paulo, por sua vez, apesar de não citar nominalmente o conceito do DOT, incorpora muitas de suas premissas (e. g. priorizar o uso do transporte público, valorizar o pedestre e seus percursos, implementar múltiplos modais, incentivar o uso misto e a multicentralidade, distribuir equilibradamente serviços urbanos ao longo dos bairros e orientar o crescimento da cidade nas proximidades do transporte público) na elaboração de seu Plano Diretor Estratégico (SÃO PAULO, 2014).

#### 1.2.4. Tipologias

A *Reconnecting America* (2016) propõe uma classificação de áreas de DOT segundo as seguintes tipologias: a) centros regionais – são os centros primários de atividade econômica e cultural em uma região. Caracterizam-se por uma alta mistura, diversidade e quantidade de habitações e empregos, comércio e entretenimento que atendem ao mercado regional. São servidos por uma

rica combinação de modos de transporte que suportam toda essa atividade, incluindo alta capacidade ferroviária regional e ônibus; b) centros urbanos – contêm alta diversidade em densidades ligeiramente mais baixas que o centro regional; c) centros suburbanos - atuam como origem e destino para os usuários, com algumas opções de transporte conectando a rede regional. Possuem mais áreas de uso único e notoriamente maiores intensidades no raio de quatrocentos metros das estações; d) centralidades de trânsito - centros de desenvolvimento econômico e de atividades, servidos por uma variedade de modos de trânsito, principalmente prestação de serviços suburbanos e empregos na região. As densidades são, geralmente, visivelmente maiores no raio de 400m das estações; e) bairros urbanos – possuem entre moderadas e altas densidades. Intensidades são normalmente distribuídas de maneira uniforme ao longo do raio de 800m com um incremento de perto da estação; f) bairros de trânsito - geralmente não possuem densidade suficiente para suportar muito comércio local. São tipicamente servidos por transporte ferroviário ou várias linhas de ônibus em um único local; g) distritos de uso especial - são organizadas em torno de uma universidade ou estádio de esportes. As densidades são geralmente bem distribuídas no raio de 800m em torno das estações, e; h) corredores de uso misto - oferecem boas oportunidades para desenvolvimento denso e diversificado. São um foco para o desenvolvimento econômico e comunitário, mas não possuem um centro definido, embora o desenvolvimento seja geralmente mais intenso dentro do raio de 400m das paradas de transporte.

No âmbito do DOT, diferentes localidades possuem determinadas vocações que variam de acordo com sua posição na rede, sua densidade e a intensidade de suas atividades. Cada área de estação, existente ou proposta, requer estratégias especialmente adaptadas para atender às

demandas do DOT em si. Contudo, diferentes zonas compartilham características semelhantes e por esta razão podem ser abordadas de maneiras análogas. Neste cenário, considerar como o conceito do DOT pode se manifestar em diferentes contextos é importante para compreender, também, como este modelo pode ser implementado em diferentes escalas e realidades urbanas sem, contudo, prescindir de seus princípios estruturadores.

### *1.3. Princípios mensuráveis e referências de cálculo para o DOT*

Em trabalhos anteriores afirmamos (LIMA et al 2016a; 2016b) que o DOT é um modelo de desenvolvimento urbano que considera princípios mensuráveis (e, portanto, programáveis) para melhorar o desempenho sustentável de bairros e centros urbanos - sob a perspectiva da mobilidade urbana e do uso do solo. Neste contexto, e considerando o universo de interesse e o escopo desta tese, é possível estabelecer parâmetros-chave que permitam avaliar configurações urbanas sob a perspectiva dos princípios do DOT, e que sejam alvo de especial atenção no desenvolvimento desta investigação.

As premissas fundamentais que estruturam o conceito do DOT variam de acordo com algumas definições, mas em essência, podem ser mensuradas por meio de características ou propriedades objetivas como: distância física<sup>14</sup>; distância topológica<sup>15</sup>; densidade física; densidade populacional; contagem/posicionamento de equipamentos urbanos, entre outros. Nesta pesquisa, as premissas do DOT postuladas por Calthorpe (1993); Cervero & Kockelman (1997); Calthorpe & Fulton (2001); Dittmar & Ohland (2004); Suzuki et al (2013), entre outros, são articuladas por meio de quatro princípios básicos, que foram mencionados anteriormente e que visam a permitir a quantificação e análise de características fundamentais

---

<sup>14</sup> O termo “distância física”, no contexto desta tese, se refere àquela dada (em metros, por exemplo) pelo menor caminho disponível (considerando as inclinações no percurso) para conectar duas localidades, e não necessariamente pela linha reta entre dois pontos. Isto é, a distância física é dada pela distância percorrida para se alcançar um ponto B, partindo de um ponto A.

<sup>15</sup> O termo “distância topológica” é aqui utilizado no mesmo sentido daquele proposto na teoria da sintaxe espacial, proposta por Hillier & Hanson (1984), ou seja: o número de ruas (ou de mudanças de direção) necessárias para se alcançar um determinado destino. Esta métrica será mais profundamente apresentada na subseção sobre acessibilidade ao transporte.

do DOT, são eles: a) a acessibilidade ao transporte - localização de serviços, comércio e habitação em torno de estações de transporte, proporcionando curtas distâncias para o acesso ao transporte coletivo; b) a caminhabilidade - a capacidade que uma determinada localidade possui de conectar habitações e diversos serviços urbanos por meio de distâncias que podem ser percorridas a pé, conferindo maior vitalidade às ruas e ao bairro como um todo; c) a diversidade - uso misto e equilibrado dentro de um mesmo distrito, proporcionando maior autonomia para os bairros, e; d) a compacidade - alta ocupação populacional dentro dos bairros, de maneira compacta e densa, permitindo suportar diferentes modais.

### 1.3.1. Acessibilidade ao transporte

Promover curtas distâncias até o acesso ao transporte público significa conectar melhor a cidade, incentivar a caminhada, o ciclismo e a utilização do sistema de transporte público. A distância possui implicações substanciais para a viabilidade e a eficácia de um sistema de transporte público: em essência, a distância permite mensurar a proximidade ou a acessibilidade<sup>16</sup> de uma estação de trânsito. (OGRA & NDBELE, 2014)

Entretanto, frequentemente, os esforços em tornar as cidades mais conectadas têm tido como premissa a opção por proporcionar a movimentação de pessoas ao redor da cidade mais rapidamente, com a abertura de uma quantidade cada vez maior de vias para deslocamento de

---

<sup>16</sup> O termo “acessibilidade” é aqui adotado, de maneira mais restrita, como aquele que se refere à proximidade (física ou topológica) entre dois ou mais pontos e não necessariamente como forma de designar a disciplina que busca promover o acesso de pessoas portadoras de algum tipo de deficiência ou mobilidade reduzida.

automóveis, e não por trazer os serviços urbanos mais próximos das pessoas. A este respeito, Calthorpe (1993) pontua que os sistemas de transporte precisam ser estruturados de maneira a facilitar o acesso a uma grande variedade de destinos, como trabalho, serviços, recreação, entre outros.

Neste contexto, a acessibilidade ao transporte é um princípio fundamental dentro da equação do DOT e uma questão importante para esta pesquisa, uma vez que preconiza a proximidade (física e/ou topológica) entre a estação e/ou paradas de transporte e os locais de moradia, trabalho e demais destinos de uma área urbana.

- **Referências de cálculo para se aferir a acessibilidade ao transporte**

A acessibilidade ao transporte de uma determinada área pode ser aferida por meio do cálculo da distância dos menores percursos entre uma determinada estação e sua área de influência (ou bairro). Importa, sob esta noção, mensurar a distância física para a estação, considerando as inclinações no percurso, mas também a distância topológica, ou seja: o número de ruas (ou de mudanças de direção) necessárias para se alcançar o destino. Assim, quanto menores as distâncias - físicas e topológicas - entre todos os destinos de uma determinada localidade e sua respectiva estação, maior a acessibilidade ao transporte deste bairro.

Gehl (2013, p.121) afirma que “a distância aceitável de caminhada é um conceito relativamente fluido” e que fatores como a qualidade do percurso, a superfície, a quantidade de pessoas e os obstáculos no trajeto influenciam este dado. Entretanto, o próprio Gehl (2013, p.121) reconhece a necessidade de estabelecer uma meta para deslocamentos a pé ao afirmar que “o

tamanho dos centros das cidades confirma a distância de 500 metros como um objetivo aproximado de uma caminhada aceitável”.

A grande maioria dos centros das cidades tem um quilometro quadrado, correspondendo a uma área de 1x1 km. Isso significa que uma caminhada de um quilometro ou menos levará os pedestres à maior parte dos serviços.

Cidades gigantescas como Londres e Nova York têm padrões equivalentes, já que se dividem em vários centros e bairros. O tamanho mágico do centro de 1km<sup>2</sup> também pode ser encontrado nestas cidades. A distância de caminhada aceitável não vai mudar só porque a cidade é grande (GEHL, 2013, p.121).

Em concordância com o valor aceitável para Gehl, um valor de referência comumente aceito para estabelecer a distância ideal para uma estação de transporte é o de cinco minutos (ou menos) de deslocamento (ver Figura 4). Para distâncias percorridas a pé, estipula-se 400m, e para distâncias percorridas de bicicleta, 1600m (FARR, 2013; SUZUKI et al, 2013). Entretanto, estas medidas não podem ser obtidas por meio da relação simples entre a posição da estação e o desenho de um círculo (*buffer*) que delimite sua área de influência, uma vez que os percursos nas cidades nem sempre se dão em linhas que conectam diretamente dois pontos, mas em função do desenho das vias. Assim, é fundamental considerar a rede de ruas em que se dão os deslocamentos para que as distâncias dos percursos sejam precisamente calculadas (ver Figura 5), o que significa abordar regras de cálculo mais elaboradas.

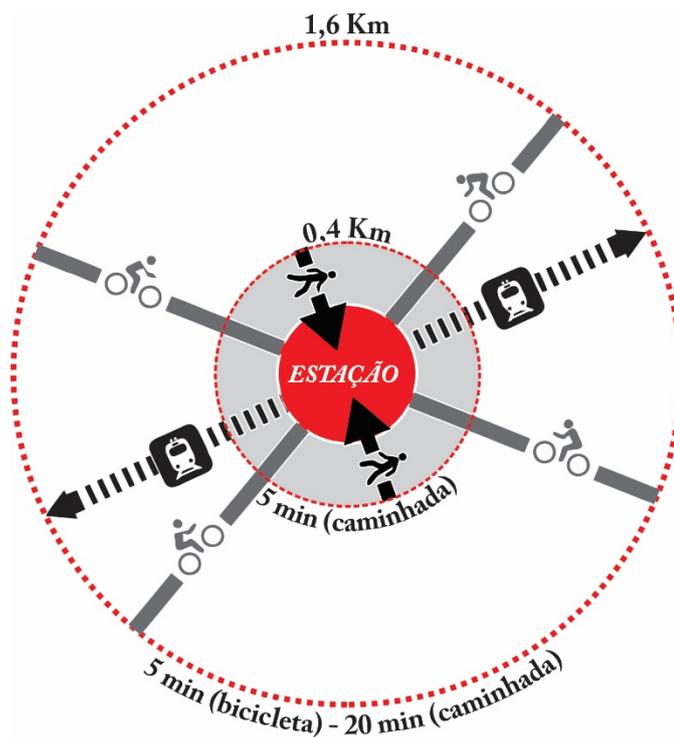


Figura 4. Valores de referência para distâncias ideais entre a estação e as demais localidades de um bairro, considerando deslocamentos feitos a pé ou de bicicleta. Fonte: Adaptado de *Human Transit* (2015).

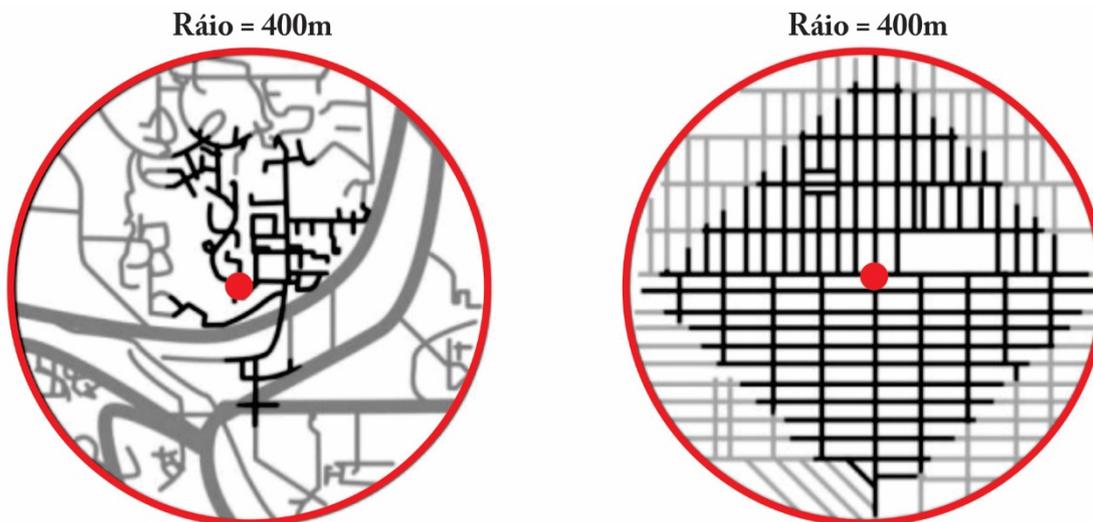


Figura 5. Exemplos da diferença entre o cálculo dos percursos de 400m de distância (linhas pretas) para uma estação de transporte (ponto vermelho) considerando o desenho das ruas em contraponto ao cálculo que considera um círculo de raio de 400m como limite. Fonte: Adaptado de: <http://www.humantransit.org>. Acesso em 08 de jun. de 2015.

Há de se considerar ainda que, embora a meta de até 400m de distância para o transporte seja comumente aceita, não se pode compreendê-la como um limite rígido. Não faz sentido supor que alguém que resida a 395m da estação tenha plena acessibilidade ao transporte, enquanto seu vizinho, que vive a 405m do mesmo ponto, esteja completamente isolado. Obviamente, a relação entre a distância física e a acessibilidade ao transporte é uma curva contínua, sem interrupções bruscas. Instrumentos que visem mensurar o atendimento a este princípio devem considerar estas nuances.

Hillier & Hanson (1984) propõem a teoria da Sintaxe Espacial para descrever as relações espaciais de uma determinada localidade através de medidas quantitativas (ou sintáticas), que possibilitam compreender aspectos importantes do sistema urbano, como a acessibilidade e a distribuição de usos do solo.

Dentre as medidas sintáticas, a principal é chamada integração. Esta medida é utilizada para a previsão de fluxos de pedestres e veículos em um determinado espaço, o que lhe confere utilidade para o entendimento da dinâmica dos encontros sociais e do posicionamento de diferentes atividades urbanas. A integração mede quão “profundo”, ou distante, um determinado espaço está de todos os outros espaços do sistema (HILLIER et al, 1993). No entanto, o conceito de profundidade considera a distância topológica, e não a distância física. Assim, todos os espaços diretamente conectados estão a um passo topológico entre si. Espaços que se conectem por intermédio de um outro espaço estão a dois passos topológicos de distância, e assim sucessivamente. A profundidade média de um determinado espaço é, portanto, obtida pela somatória das profundidades de todos os demais espaços em relação a ele, dividida pelo número total de espaços menos um.

Uma outra medida sintática a ser considerada no contexto desta pesquisa é a conectividade. Esta medida calcula a quantidade de espaços (ou vias, no contexto urbano) que se interceptam. Ou seja, a conectividade pode ser usada para computar quantas conexões diretas com outros espaços (ou ruas) uma determinada via possui, o que permite compreender sua importância em uma rede. Espaços com alta conectividade tendem a ter um papel estruturador, uma vez que promovem, potencialmente, acesso a um grande número de outros espaços.

### 1.3.2. Caminhabilidade

Gehl (2013) defende que a cidade tende a se tornar mais viva, na medida em que mais pessoas sintam-se convidadas a caminhar, pedalar ou permanecer nos espaços públicos, interagindo e trocando informações e oportunidades sociais e culturais. Caminhar por um bairro que possua parques, serviços e comércios que estejam diretamente conectados a uma pequena distância, é sem dúvida, uma atividade muito mais agradável que andar por regiões onde estes se encontram dispersos, o que tende a trazer mais pessoas para o convívio no espaço urbano.

Para Farr (2013), a caminhabilidade consiste na capacidade que um determinado bairro possui de conectar habitações, pontos de comércio e demais serviços por meio de distâncias que podem ser percorridas a pé, conferindo, assim, maior autonomia, menor dependência do automóvel e “uma rede viária em que se possa caminhar e um desenho que permita vida urbana e opções de transporte” (FARR, 2013, p.109). Neste sentido, o princípio da caminhabilidade, no contexto desta investigação, é aquele que preconiza a organização do espaço urbano em função de

promover as menores distâncias possíveis<sup>17</sup> aos inúmeros serviços que um bairro estruturado na lógica do DOT deve possuir. A Figura 6 ilustra esta lógica:

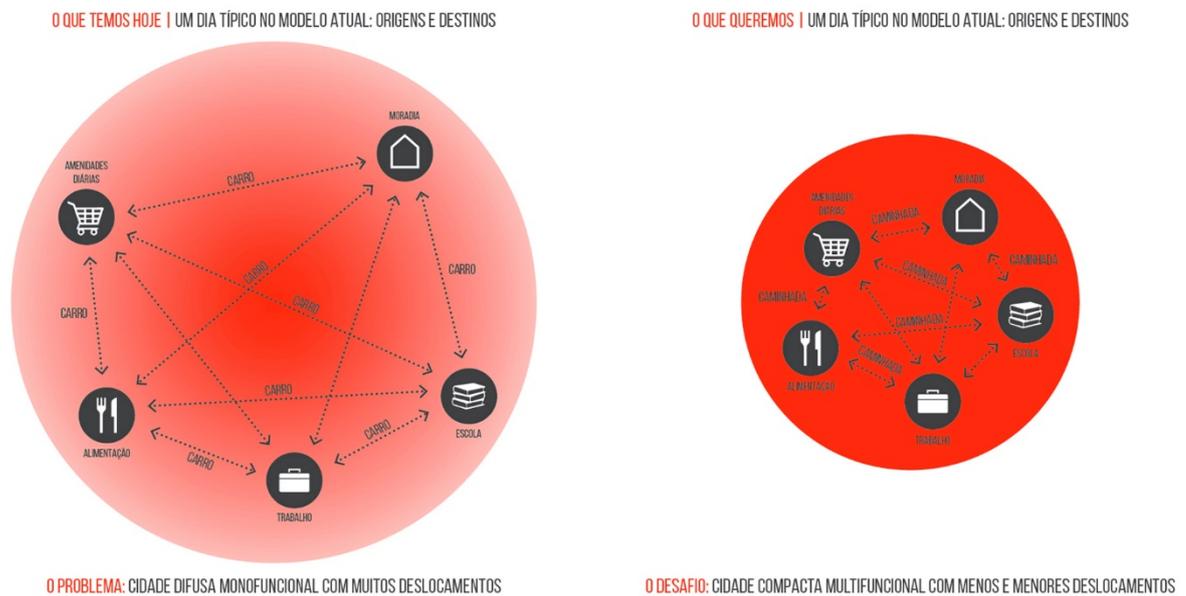


Figura 6. Modelo de metabolismo urbano defendido pelo DOT. Cidade caminhável, compacta e multifuncional com distâncias que podem ser vencidas a pé. Pretende-se a substituição de uma lógica que preconiza muitos deslocamentos baseados em automóveis por uma lógica que incentive maior quantidade de deslocamentos mais curtos (a pé ou bicicleta) e menor quantidade de trajetos de carro. Fonte: Stuchi & Leite (2015, pp 58-59).

No caso específico da caminhabilidade, as análises ganham contornos mais complexos quando comparadas ao cálculo da acessibilidade ao transporte. Isso porque aqui interessa avaliar não apenas a distância para um equipamento único (no caso da acessibilidade ao transporte a estação), mas importa verificar qual o nível de acesso a diferentes serviços essenciais à vida nas cidades, o que significa abordar: a) quais categorias de serviços estão disponíveis em uma

<sup>17</sup> Evidentemente, quanto menor for a distância entre as localidades de um bairro e seus serviços, maiores serão os índices de caminhabilidade. No entanto, há certo consenso de que distâncias de até 400m são consideradas como ideais. Na sequência, serão apresentados detalhes sobre referências de cálculo referentes ao conceito de caminhabilidade adotado nesta investigação.

determinada vizinhança (e. g. educação, comércio, alimentação, recreação, entre outros); b) qual a proximidade dos serviços em cada uma destas categorias (considerando distâncias físicas e topológicas); c) qual a diversidade destas categorias, uma vez que cada uma delas engloba diferentes atividades (no caso da educação, por exemplo, creches, escolas e faculdades desempenham papéis diferentes, mas igualmente importantes para a dinâmica de um bairro), e; d) qual a quantidade destes serviços em cada categoria, o que possui correspondência direta com as opções disponíveis em uma determinada área urbana.

- **Referências de cálculo para se aferir a caminhabilidade**

Diversas estratégias e instrumentos têm sido desenvolvidos no intuito de mensurar a caminhabilidade de um determinado local. Um destes instrumentos é o *Walkscore*, um algoritmo que, segundo Carr et al (2011), gera uma pontuação que se baseia na distância entre uma determinada localidade e os pontos de comércio e serviço mais próximos a ela. Estes pontos são classificados em cinco categorias (educacional, alimentação, comércio, entretenimento e recreação), são ponderados com mesmo peso e somados, resultando em um único índice que classifica a caminhabilidade de um determinado local. Por exemplo, se em relação a uma determinada localidade o serviço mais próximo em uma categoria está a 400m (cinco minutos de caminhada ou menos), então o número máximo de pontos é atribuído para esta localidade nesta categoria. O número de pontos diminui à medida que a distância se aproxima de 1,6 km (30 minutos de caminhada) e não são atribuídos pontos para serviços com mais de 1,6 km de distância. Cada categoria possui o mesmo peso e os pontos são somados e normalizados para produzir uma pontuação entre 0-100, o que permite classificar a caminhabilidade de uma

determinada área (ver Tabela 1). O número de serviços disponíveis e a suas distâncias para as residências nas proximidades são os principais parâmetros para promover a caminhabilidade, conforme ilustra a Figura 7.



Figura 7. A distância entre funções urbanas e um determinado local determina seu *Walkscore*. Um algoritmo que calcule esta relação, pode alimentar um sistema que permita propor vizinhanças com caminhabilidade otimizada. Fonte: Walkscore (2014).

Tabela 1. Classificação de valores de Walkscore. Fonte: Walkscore (2014).

<b>90-100</b>	<b><i>Walker's paradise</i></b> Percurso diários não demandam automóvel
<b>70-89</b>	<b><i>Very walkable</i></b> A maioria dos percursos podem ser vencidos a pé.
<b>50-69</b>	<b><i>Somewhat walkable</i></b> Alguns percursos podem ser vencidos a pé.
<b>25-49</b>	<b><i>Car-dependent</i></b> A maioria dos percursos demandam automóvel
<b>0-24</b>	<b><i>Car-dependent</i></b> Quase todos os percursos demandam automóvel.

Frank et al (2005) e Dobesova & Krivka (2012) utilizam o *Walkability Index*, um outro instrumento que visa a mensurar a caminhabilidade de uma determinada área. Para isto, este

indicador considera quatro subíndices que avaliam diferentes aspectos relacionados à caminhabilidade, são eles: (a) *Connectivity Index* – também denominado *Intersection Index*, este subíndice, que adapta medidas da teoria da sintaxe espacial, calcula o número de interseções entre ruas por metro quadrado de uma determinada área, de maneira a procurar indicar quão conectada uma determinada vizinhança é; (b) *Entropy Index* – visa a mensurar quão diverso é o uso de uma determinada área, ao quantificar diferentes funções em uma área urbana, de acordo com as seguintes categorias: residencial, comercial, serviços, industrial, institucional, e outros; (c) *Floor Area Ratio Index* – considera a proporção entre as áreas de cada serviço e a área total de sua respectiva categoria; (d) *Household density index* – informa a densidade populacional de uma determinada localidade com base no número de domicílios.

Existem ainda inúmeros índices e instrumentos que visam mensurar características relacionadas à caminhabilidade de uma determinada localidade. Alguns abordam, inclusive, questões subjetivas, relacionadas com a percepção do pedestre (ZACHARIAS, 2001; ZAMPIERI, 2006; JUNDIAÍ, 2015; entre outros). Entretanto, considerando o espectro de interesse e os objetivos de aplicação desta investigação, os dois índices apresentados (*Walkscore* e *Walkability Index*) são alvo de especial atenção por tratarem aspectos objetivos e essencialmente mensuráveis, que podem servir de referência para o desenvolvimento de métricas e instrumentos que permitam medir e otimizar o desempenho de configurações urbanas com base em aspectos objetivos.

### 1.3.3. Diversidade

Calthorpe (1993) entende que o uso diversificado na escala do bairro é um fator primordial para a sustentabilidade das cidades, e por isso reforça a importância de vizinhanças multifuncionais. Rogers (1997) defende o uso misto e a diversidade para um melhor aproveitamento de espaços, em uma lógica em que tudo acontece simultaneamente: morar, trabalhar, consumir e recrear em uma mesma área, o que visa a atender o princípio de posicionar serviços e comércios sem a necessidade de grandes deslocamentos. Neste sentido, bairros configurados com diversos tipos de serviços que se complementem, incentivam as pessoas a deslocarem-se a pé, por meio da proximidade de diferentes serviços necessários no cotidiano - permitindo o contato e a integração de pessoas de diferentes culturas e classes, potencializando a qualidade de interação e de vida social. Panerai et al (2013) defendem que a questão do tecido urbano não pode ser dissociada da experiência cotidiana da cidade. Neste contexto, ressaltam, ainda, a importância de ações sustentáveis no projeto urbano como um espaço público acessível a todos, atividades que se misturem, edifícios que se adaptem e se transformem e vizinhanças mistas.

O princípio da diversidade, no contexto desta investigação, é aquele que preconiza a distribuição equilibrada entre as áreas residenciais e as não residenciais em uma mesma vizinhança. Quanto mais equilibrada for esta relação, menor a quantidade de grandes deslocamentos tende a ser, o que significa bairros mais autônomos e sustentáveis. Este princípio, também fundamental para o conceito do DOT, atende à premissa da cidade polinucleada com centralidades multifuncionais, que defende que todos os serviços essenciais à vida urbana estejam acessíveis dentro de um bairro por meio de distâncias caminháveis, ou ainda, por meio de transportes coletivos e integrados que permitam acesso a outros bairros, igualmente diversos e caminháveis.

Corbella e Barbosa (2009) consideram que o modelo de organização “em células” para centros urbanos é uma estratégia eficiente para um desenvolvimento urbano sustentável. A conveniência em organizar a cidade em diversos núcleos diversificados reside na facilidade de estabelecer interações e está diretamente relacionada à diversidade nos bairros. Isso significa a descentralização e pulverização dos serviços urbanos, o que permite promover uma rede de atividades e informações, no intuito de reduzir os deslocamentos, por meio de uma cidade policêntrica e diversificada, conforme ilustra a Figura 8.

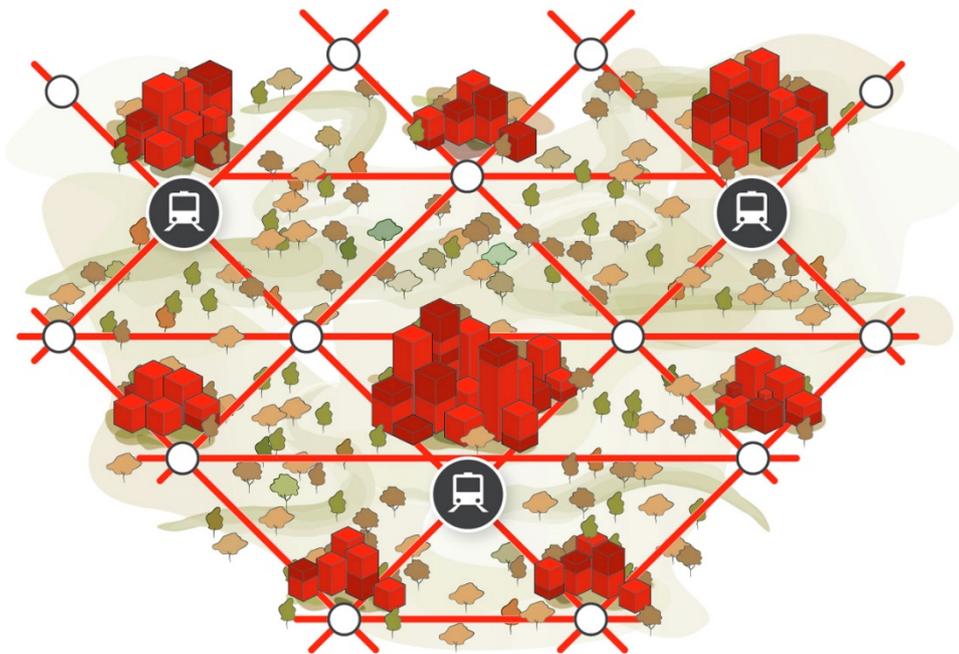


Figura 8. Modelo de cidade policêntrica. Vizinhanças articuladas em rede e conectadas por um sistema de transporte eficiente com diversidade de modais se relacionam diretamente com o conceito de diversidade nos bairros. Fonte: Stuchi & Leite (2015, p. 56).

- **Referências de cálculo para se aferir a diversidade**

Hoek (2008) propõe um indicador que visa a mensurar quão diversificada uma determinada área urbana é. Trata-se do *Mixed-Use Index* (MXI), que calcula a proporção entre a soma de

todas as áreas residenciais e não residenciais de um bairro, realizando uma comparação destas proporções, conforme demonstrado na Tabela 2. Quanto mais próxima a relação entre as áreas é de 50/50, maior a diversidade que uma área urbana possui.

Tabela 2. Valores de referência para o MXI. Fonte: Hoek (2008).

MXI	0	50	100
Significado	Não residencial	Equilíbrio 50/50	Residencial
Tipo	Monofuncional	Uso misto	Monofuncional
Exemplos	Complexo Industrial ou comercial/serviços	Centro da Cidade	Subúrbio

#### 1.3.4. Compacidade

A compacidade em áreas urbanas é uma ideia defendida por diversos autores (DANTZIG & SAATY, 1973; ROGERS, 1997; GLAESER, 2011; LEITE, 2012; CHAKRABARTI, 2013; FARR, 2013; GEHL, 2013; SUZUKI et al, 2013; STUCHI & LEITE, 2015). Rogers (1997) afirma que cidades sustentáveis são compactas, pois a cidade compacta propicia otimizar o desempenho de energia, reduzir o nível de poluição e o consumo de recursos, além de oferecer as vantagens de se morar próximo ao local de trabalho e do outro, em uma busca pela redescoberta da proximidade.

Segundo Stuchi & Leite (2015), a noção de cidade compacta se sustenta em três pilares: a otimização de recursos, a inovação e a sustentabilidade. A otimização de recursos se dá à medida em que “maiores densidades urbanas potencializam as infraestruturas urbanas, as ruas e os sistemas de transporte, redes de cabos ou fibras e equipamentos públicos” (STUCHI & LEITE, 2015, p.30). Além de aproximar pessoas e suas necessidades urbanas, cidades mais compactas

desperdiçam menos investimentos públicos. (STUCHI & LEITE, 2015). A inovação acontece, porque cidades compactas “propiciam concentração de diversidade que gera inovação e oportunidades únicas (seja em termos de conhecimento, cultura ou desenvolvimento econômico)” (STUCHI & LEITE, 2015, p.30).

Maiores densidades promovem o encontro, a diversidade e otimizam o uso de infraestruturas urbanas e recursos públicos, além de determinarem menores consumos (principalmente de recursos energéticos) per capita e menor produção de resíduos e de gases de efeito estufa. Ou seja, “cidades compactas são mais sustentáveis” (STUCHI & LEITE, 2015, p.31). Para Rogers (1997), a cidade compacta, além de ser sustentável, promove maior autonomia a áreas urbanas, abrigando atividades diversas e que, ao mesmo tempo, se complementam e sobrepõem. Para Leite (2012), “a opção pelos parâmetros advindos da cidade compacta tem sido consenso internacional” (LEITE, 2012, p.135). A Figura 9 ilustra a lógica defendida.

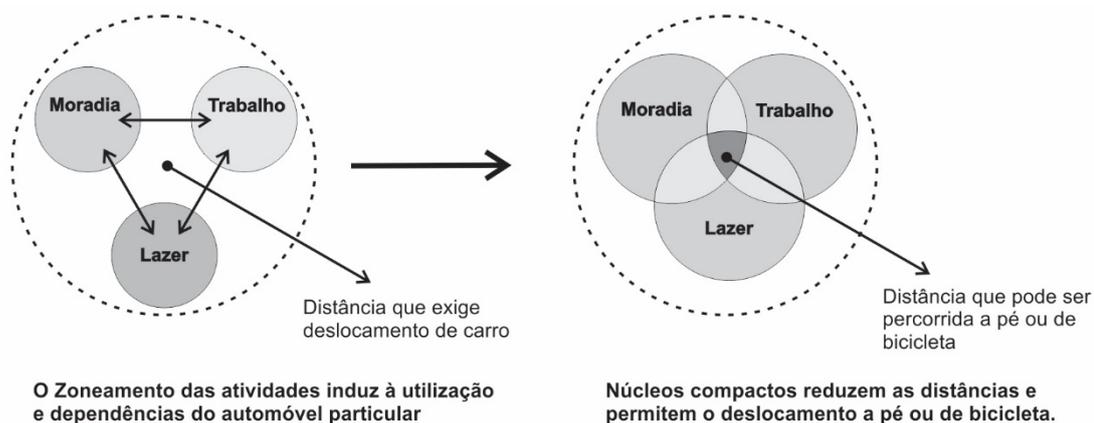


Figura 9. Esquema de funcionamento da cidade compacta. Fonte Rogers (1997, p.39).

Conforme mencionado anteriormente, um desafio crítico voltado para aqueles que pensam e planejam a cidade é o alto nível de dependência do automóvel. Desenvolvimentos de baixa

densidade têm influência direta nesta questão. Assim, Ogra & Ndebele (2014) apontam que as áreas urbanas devem ser concebidas de maneira a suportar desenvolvimentos de alta densidade, complementados por uso do solo misto e investimentos em sistemas de transportes públicos. A este respeito, altas densidades estão normalmente relacionadas a menores distâncias médias de viagem para todos os modais. Este quadro encoraja a ocupação e remodelação ao longo dos corredores de trânsito dentro dos bairros, com o objetivo de permitir que o sistema funcione de forma eficiente. A principal premissa do desenvolvimento de alta densidade assume que a colocação de edifícios residenciais perto de grandes nós de transporte, instalações e locais de trabalho irá aumentar a conveniência e, portanto, a aceitação de modos de transporte sustentáveis.

Neste contexto, a compacidade é um princípio fundamental na lógica do DOT, uma vez que preconiza o adensamento de áreas urbanas por meio da verticalização e da concentração de atividades e equipamentos. Instrumentos para mensurar diferentes aspectos da densidade de uma área urbana são indispensáveis para articular relações entre os serviços disponíveis, os modais de transportes e a quantidade potencial de pessoas que podem residir e trabalhar em uma determinada localidade.

- **Referências de cálculo para se aferir a compacidade**

Pont & Haupt (2010) propõem uma abordagem de múltiplas variáveis para medição de diferentes indicadores de densidade, o *Spacematrix*. Este conjunto de índices visa a oferecer um método específico o suficiente para permitir a análise de tipos urbanos e o gerenciamento de

quantidades excessivas de dados sem, no entanto, estabelecer definições excessivamente detalhadas.

O *Spacematrix* consiste em três indicadores fundamentais: Intensidade (*Floor Space Index* -FSI), Cobertura (*Ground Space Index* - GSI) e Densidade da rede (*Network density* -N). O FSI reflete a intensidade de construção, e é dado pela divisão entre a área total construída e a área do local que se analisa. O GSI demonstra a relação entre espaços construídos e não construídos, e é calculado por meio da razão entre a área ocupada no solo e a área do local que se analisa. N refere-se à concentração de redes em um dado tecido, e é obtido por meio da divisão entre o somatório da extensão das ruas internas com a metade do perímetro das ruas que delimitam uma área, mais a área total do local que se analisa (PONT & HAUPT, 2010). Os indicadores de *Spacematrix* são instrumentos dinâmicos que fornecem avaliações objetivas das questões de densidade e podem ser adaptados à diversas escalas urbanas (edifício, lote, quadra, tecido e bairro), o que os credenciam como um importante instrumento no escopo desta investigação. A Figura 10 ilustra os parâmetros de cálculo empregado.

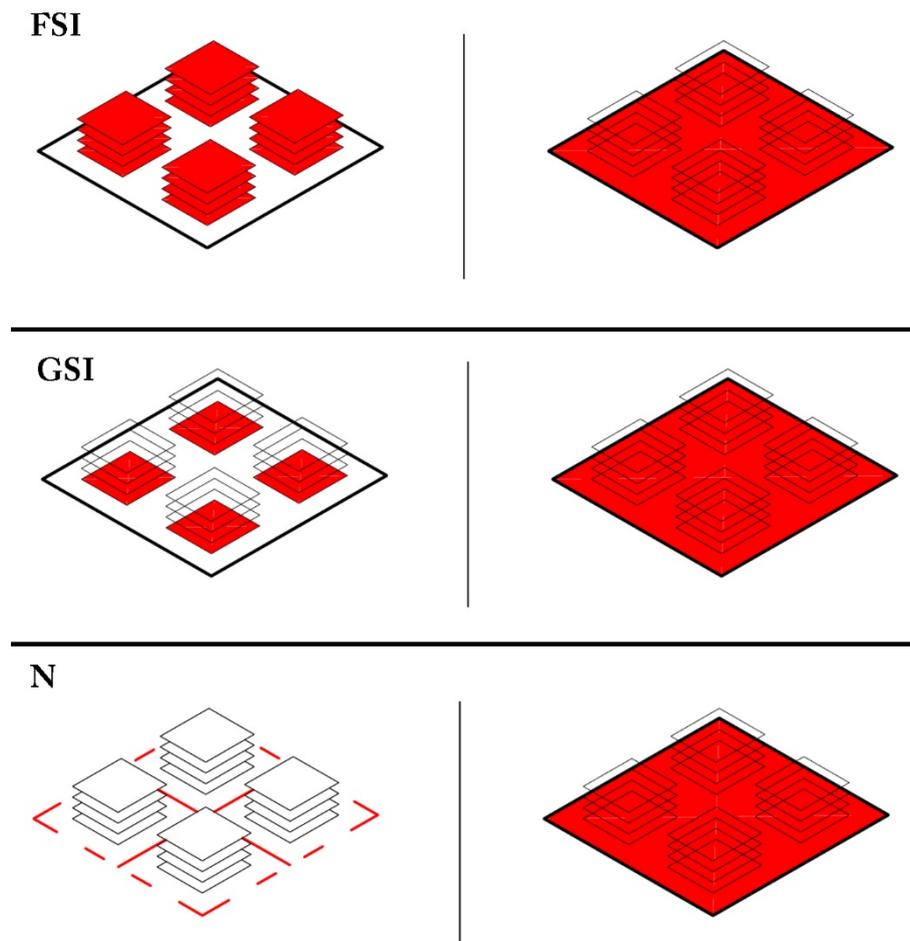


Figura 10. Ilustração dos parâmetros de cálculo para FSI, GSI e N, respectivamente. Fonte: Pont & Haupt (2010, p.77).

Um outro aspecto importante a ser considerado no contexto da compactidade diz respeito à relação entre densidades habitacionais e diferentes modais de transporte. Neste sentido, Pushkarev & Zupan (1977) estabelecem densidades residenciais mínimas necessárias para dar suporte a diferentes modais de transporte, como a Tabela 3 apresenta:

Tabela 3. Densidades residenciais mínimas necessárias (em unidades residenciais por hectare) para suporte a diferentes modais de transporte. Fonte: Pushkarev e Zupan (1977).

Modal	Serviço	Densidade mínima
Ônibus local	“Mínimo”: paradas a cada 800m, 20 ônibus por dia	10,0
Ônibus local	“Intermediário”: paradas a cada 800m, 40 ônibus por dia	17,5
Ônibus local	“Frequente”: paradas a cada 800m, 120 ônibus por dia	37,5
Ônibus Expresso (Acessado a pé)	Cinco ônibus durante um período de pico de duas horas	37,5 Cobertura de 5km <sup>2</sup>
Ônibus Expresso (Acesso por carro)	De cinco a dez ônibus durante um período de duas horas	7,5 Cobertura de 50km <sup>2</sup>
Metrô leve	Partidas a cada cinco minutos ou menos (horário de pico)	22,5 65 a 260Km <sup>2</sup>
Ônibus em corredor	Partidas a cada cinco minutos ou menos (horário de pico)	30 Corredor de 260 a 390Km <sup>2</sup>
Trem suburbano	20 trens por dia	2,5 a 5,0

### *1.4. Reflexões sobre o DOT*

Planejar cidades para uma organização eficiente é o método mais eficaz e sustentável para reduzir os impactos do paradigma atual de mobilidade nos centros urbanos e promover uma vida mais interativa nas cidades. Neste cenário, o DOT é um modelo de crescente adesão ao redor do mundo, que se baseia em alguns princípios mensuráveis para melhorar o desempenho (sob a perspectiva da mobilidade urbana e do uso do solo sustentáveis) de bairros e cidades, por meio de uma ordenação urbana que preconiza a proximidade ao transporte e demais serviços essenciais, a distribuição equilibrada de atividades e a compactação e o adensamento dos centros urbanos.

Ademais, o DOT é dependente de múltiplas variáveis, uma vez que se utiliza de referências essencialmente mensuráveis como estratégia para qualificar a vida urbana. Neste contexto, torna-se possível a identificação de uma série de atributos quantificáveis - ou métricas - que podem ser utilizadas para auxiliar na proposição de cidades mais dinâmicas, caminháveis, compactas e diversificadas. Ou seja, o DOT constitui uma base teórica e prática com inúmeras possibilidades para exploração e para implementação suportada por recursos algorítmico-paramétricos. Por essa razão, as bases do DOT podem ser adotadas como referência de princípio para o desenvolvimento do sistema relativo a esta investigação.

Além disso, segundo diversos autores, ainda não foram suficientemente desenvolvidos sistemas para a avaliação e a otimização de parâmetros (e da grande quantidade de dados) envolvidos no contexto do DOT que visem a suportar um sistema de implementação mais dinâmico e eficiente. Em contrapartida, o DOT representa um tipo de proposição complexa, derivada de

algumas variáveis cruciais para seus objetivos. Desta forma, trata-se de um modelo que pode ser em grande parte programável, o que o credencia como um caso potencial para implementação algorítmico-paramétrica e como base para a elaboração de um sistema de análise e otimização de desempenho, suportado por atributos mensuráveis e recursos computacionais.



“A matemática é o alfabeto com qual, Deus escreveu o universo”

**Galileu Galilei**

O presente capítulo visa a realizar uma revisão da aplicação de modelos e recursos computacionais no contexto urbano, de maneira a articular e enquadrar esta investigação no universo de pesquisas já desenvolvidas e identificar funcionalidades e instrumentos que possam ser incorporados ao escopo desta tese. Sendo assim, este capítulo expõe uma contextualização sobre a lógica algorítmico-paramétrica (que sustentará boa parte das bases metodológicas desta pesquisa), seguida de uma revisão de modelos computacionais especificamente desenvolvidos para suporte a processos de projeto urbano, além de uma apresentação de funcionalidades identificadas como potencialmente úteis à elaboração do sistema e das ferramentas que se pretendem no contexto desta tese.

### *2.1. Lógica algorítmico-paramétrica em contexto urbanístico*

A aplicação de recursos algorítmico-paramétricos em contexto urbanístico constitui uma possibilidade relativamente nova para o planejamento e o projeto das cidades. A introdução de ferramentas digitais no campo da arquitetura data do final da década de 1960 (HENRIQUES, 2013), com um impacto crescente na prática de projeto arquitetônico - fenômeno que não encontra, até os dias de hoje, um rebatimento equivalente no contexto da proposição em áreas urbanas. Aplicações computacionais no campo do urbanismo, apesar de crescentes, ainda se encontram ou em menor quantidade, ou não tão desenvolvidas quanto aquelas voltadas ao campo da arquitetura (STEINØ & VEIRUM, 2005; GIL et al, 2010; DUARTE et al, 2012).

Entretanto, recursos computacionais possuem grande potencial para contribuir significativamente no suporte a solução de problemas das cidades, pois, entre outros aspectos, podem proporcionar um controle dinâmico (intervenção, atualização e avaliação de modificações) das partes componentes de um sistema complexo, como é o caso dos centros urbanos.

Neste cenário, investigar sobre diferentes aspectos relativos à implementação computacional (e mais especificamente sobre a implementação da lógica algorítmico-paramétrica) na escala urbana, é importante não só para compreender a natureza deste fenômeno em si, mas para contextualizar a abordagem desenvolvida nesta tese. Esta seção visa a delinear a noção de lógica algorítmico-paramétrica adotada nesta investigação, por meio da articulação de dois conceitos intimamente relacionados: lógica algorítmica e modelagem paramétrica.

### 2.1.1. Lógica algorítmica

Menges (2006) define que o ato de projetar enquanto disciplina surge como forma de abstrair e avaliar possíveis alternativas de configuração, cenários e concretizações, sem precisamente realizar fisicamente cada possível solução. Neste contexto, Mitchell & McCullough (1991) identificam a aplicação de recursos computacionais como responsáveis por uma possível alternativa aos processos convencionais de projeto, uma vez que a utilização do computador pode conferir maior capacidade de processamento de parâmetros e interações, permitindo visualizar (e avaliar) de maneira mais rápida e dinâmica, diferentes alternativas e soluções para um determinado problema.

Paralelamente, Picon (2006) identifica duas posturas possíveis frente à utilização de recursos computacionais em processos criativos. A primeira é aquela que entende o computador apenas como uma ferramenta que utiliza recursos avançados, capazes de gerar resultados sofisticados e maior domínio de soluções. Nesta lógica, entende-se que, apesar do computador alterar significativamente a natureza dos resultados obtidos, não é necessário ou até mesmo desejável o aprofundamento em detalhes de seus processos internos. A segunda postura, com a qual esta investigação se alinha, considera inevitável o aprofundamento em questões de programação e dos processos internos algorítmicos para conferir um uso mais frutífero aos recursos computacionais em atividades criativas. Assim, não se pretende limitar o conjunto das soluções consideradas a experiências pré-definidas, mas, pelo contrário, explorar uma ampla gama de soluções potenciais, em contextos menos restritivos.

Terzidis (2006) define algoritmo<sup>18</sup> como um procedimento que utiliza uma sequência finita de instruções para resolver um determinado problema, enquanto Tedeschi (2014) acrescenta que o algoritmo é uma sequência finita de instruções bem definidas e não ambíguas, utilizada para fornecer uma solução a uma pergunta ou para realizar uma determinada tarefa. Ou seja: trabalhar com algoritmos ou na lógica algorítmica significa decompor um determinado problema em um conjunto de etapas simples, que possam ser computadas e associadas de maneira a fornecer, por meio de um conjunto de instruções bem definidas, uma solução ao problema proposto. Isto implica em adotar um pensamento abstrato e associativo, além de clareza na hierarquização de informações.

Neste panorama, Kilkelly (2015) afirma que o pensamento algorítmico é o oposto do pensamento intuitivo, uma vez que envolve a utilização de um processo com etapas e procedimentos definidos para a resolução de um determinado problema. Neste senso, a ênfase está no objetivo - o problema é resolvido ou não. Isto é, programar requer pensamento algorítmico e pode significar uma maneira eficiente de auxílio a abordagens para questões urbanas.

No contexto da arquitetura e do urbanismo, diversos autores consideram que associar o uso de algoritmos com a capacidade de processamento do computador, permite gerenciar de maneira mais eficiente uma grande quantidade de dados, cálculos e interações, potencializando as possibilidades analíticas e propositivas do homem e criando novos cenários criativos e de

---

<sup>18</sup> O termo “algoritmo” possui sua origem no sobrenome Al-Khwarizmi, de um matemático persa do século IX (TEDESCHI, 2014, p.22). Um algoritmo não representa necessariamente um programa ou *software* – podendo ser, inclusive, implementado independentemente de linguagens de programação ou de ambientes computacionais.

avaliação (MITCHELL, 1977; OXMAN, 2006; TERZIDIS, 2006; WOODBURY, 2010; SCHEER, 2014; TEDESCHI 2014; VEREBES, 2014).

Assim, adotar a lógica algorítmica como um recurso de suporte a tarefas de projeto urbano pode significar uma postura mais eficiente e dinâmica para o gerenciamento e a proposição de soluções para problemas complexos das cidades. Este paradigma, suportado pelo uso de regras e padrões para lidar com grande fluxo de informações, e baseado na possibilidade de implementar ferramentas ou instrumentos especificamente desenvolvidos (ou modificados) para abordar um ou mais problemas em particular, pode ser empregado em diversos contextos e objetivos. Ou seja, trata-se de uma abordagem ampla (pois potencialmente pode ser aplicada em situações de diversas naturezas) e, ao mesmo tempo, específica (porque pode ser customizada de acordo com diferentes situações) para a procura por soluções.

### 2.1.2. Modelagem paramétrica

Velten (2009) descreve a modelagem matemática (ou simplesmente modelagem) como a área do conhecimento que utiliza modelos matemáticos para a simulação de sistemas reais, com o objetivo de prever seu comportamento. Neste cenário, e de uma maneira geral, a modelagem matemática pode ser definida como uma abordagem metodológica que pretende descrever um determinado fenômeno (e. g. distribuição de cargas em um edifício, comportamento aerodinâmico de um automóvel, entre outros) para que se obtenha previsões (ou informações) acerca de seu comportamento. A este respeito, Minsky (1968) acrescenta que para um

observador B, um objeto A' é um modelo de um objeto A, na medida em que B pode usar A' para responder às perguntas que lhe interessam sobre A.

A modelagem paramétrica, no entanto, se apresenta como introdutora de uma modificação fundamental aos paradigmas de modelagem convencional, uma vez que possibilita que as partes de um dado modelo se relacionem e se modifiquem juntamente, de maneira coordenada.

Modelar parametricamente, portanto, significa definir os parâmetros necessários para uma especificação completa ou relevante de um modelo (WOODBURY, 2010), o que demanda algumas habilidades, entre elas: a) conceber fluxos de dados; b) pensar abstratamente; c) pensar matematicamente, e; d) pensar algorítmicamente. Parametrizar significa definir os parâmetros necessários para uma especificação completa ou relevante de um modelo ou objeto geométrico (SILVA, 2010).

Para Silva & Amorim (2010), a modelagem paramétrica é regulada pela declaração dos parâmetros de um objeto particular. Isto é, a modelagem paramétrica apresenta uma abordagem essencialmente sistêmica, que permite considerar relações entre os diversos elementos de um código, possibilitando constituir um verdadeiro complexo de elementos em interação - um todo que se caracteriza através das interrelações entre suas diversas partes constituintes. Henriques & Bueno (2010) entendem que a modelagem paramétrica em contexto algorítmico corresponde à codificação de um conjunto de regras ou relações lógicas, geométricas e paramétricas, em uma determinada sequência, para resolver um problema específico.

Para Silva (2010), a aplicação da modelagem paramétrica como suporte a tarefas de planejamento urbano possui grande potencial para melhorar a sistemática de avaliação e

subsequente argumentação para propostas realizadas em áreas urbanas, uma vez que os componentes constituintes de um modelo urbano também compartilham similaridades que podem ser definidas parametricamente. Atributos como densidade, uso, forma, espaço e tipologia - que tipicamente pertencem ao planejamento urbano - podem ser definidos parametricamente (STEINØ & VEIRUM, 2005). Sendo assim, é possível não apenas contribuir para processos de projeto do espaço urbano mais eficientes e dinâmicos, mas também avaliar os prós e contras de cenários com diversos ajustes para diferentes parâmetros e atributos.

### 2.1.3. Lógica algorítmico-paramétrica

O termo “lógica algorítmico-paramétrica” é utilizado, no contexto desta investigação, para se referir a uma abordagem metodológica que pressupõe a associação entre a lógica algorítmica e a modelagem paramétrica, ou seja: a uma forma de pensamento que preconiza o aprofundamento em questões de programação para conferir um uso mais frutífero aos recursos computacionais em atividades criativas (ou, mais especificamente, em atividades de análise e proposição em contextos urbanísticos) por meio de, basicamente: a) a decomposição de uma determinada questão em um conjunto de etapas simples, que possam ser computadas e associadas de maneira a fornecer, por meio de um conjunto de instruções ou ferramentas, uma resposta a uma questão colocada ou uma solução a um problema proposto, e; b) a definição dos atributos (ou parâmetros) necessários para uma especificação completa ou relevante de um modelo que se pretende elaborar, possibilitando que diferentes partes deste modelo se relacionem e modifiquem juntamente, de maneira coordenada. Em resumo, para efeito desta

tese, a lógica algorítmico-paramétrica é aquela que implica na especificação dos parâmetros de um objeto particular e que corresponde à codificação de um conjunto de regras ou relações lógicas, cuja a intenção é a programação, a alteração, a combinação e o compartilhamento de códigos para gerenciar dados e realizar operações lógicas, de maneira a fornecer suporte à diversas tarefas de planejamento urbano. Ou seja, no contexto desta tese, o termo “lógica algorítmico-paramétrica” se refere, simplificadamente, à utilização de recursos de programação para a elaboração e a customização de ferramentas e códigos específicos, desenvolvidas em plataformas de modelagem algorítmica, como é o caso do *plugin* Grasshopper®, integrado ao *software* de modelagem Rhinoceros®.

Implementar a lógica algorítmico-paramétrica ou construir algoritmos parametricamente, neste senso, significa relacionar dados, condições e variáveis, o que implica em pensar na relação entre as partes e nas decorrências de recomposições destas relações. Relacionar e recompor impõem modificações fundamentais na maneira pela qual se empregam os recursos computacionais em tarefas de projeto e planejamento urbano. Sob esta ótica, modelos paramétricos diferem essencialmente dos sistemas tradicionais de modelagem digital, por permitirem a elaboração de propostas flexíveis, capazes de responder a modificações diversas e por manterem a capacidade de um dado modelo alterar-se constantemente, bem como por permitirem gerar (e testar) grande quantidade de versões dentro de um ambiente controlado, a partir da alteração de um ou mais parâmetros específicos.

## 2.2. Modelos de aplicações computacionais no contexto urbano

A presente seção tem o objetivo de examinar diferentes modelos de aplicações computacionais<sup>19</sup> orientados para contextos urbanísticos, de maneira a estabelecer um enquadramento sobre a aplicação destes recursos e de sistemas computacionais voltados a soluções de problemas urbanos, visando a posicionar esta investigação em um cenário de pesquisas já desenvolvidas nesta área.

### 2.2.1. *City Induction* - modelo de Duarte et al (2012)

O projeto de investigação intitulado *City Induction* é coordenado pelo professor José Pinto Duarte<sup>20</sup> e inclui ainda mais três investigadores<sup>21</sup>, estando vinculado aos laboratórios *Living Labs* (MIT *Living Labs*), do *Massachusetts Institute of Technology* (MIT) e Centro de Investigação em Arquitetura, Urbanismo e Design (CIAUD), da Universidade de Lisboa.

---

<sup>19</sup> Os modelos de aplicações computacionais aqui examinados, se situam em um contexto mais amplo, ou seja: serão abordados modelos que não necessariamente se enquadram na noção específica de lógica algorítmico-paramétrica apresentada anteriormente, mas que possuem grande importância para esta investigação por permitirem compreender diferentes abordagens orientadas para a solução de problemas urbanos por meio da elaboração de um sistema e de ferramentas computacionais associadas.

<sup>20</sup> Apesar de no momento de publicação de *City Induction* o professor José Pinto Duarte se encontrar na Faculdade de Arquitetura da Universidade de Lisboa, atualmente ele leciona na Penn State University, no estado americano da Pensilvânia, onde também ocupa o cargo de diretor do Stuckeman Center for Design Computing.

<sup>21</sup> Nuno Montenegro, José Nuno Beirão e Jorge Gil. (MONTENEGRO, 2015, p. 21).

Segundo Duarte et al (2012), este projeto objetiva a criação de um modelo para o desenvolvimento de instrumentos integrados para planos urbanos, com base na utilização de novas tecnologias digitais. *City Induction* adota como ponto de partida três teorias existentes: a linguagem de padrões de Alexander et al (1977), a sintaxe espacial de Hillier & Hanson (1984) e a gramática da forma de Stiny & Gips (1972), de maneira a “procurar integrar essas teorias para criar o modelo desejado” (DUARTE et al, 2012, p.82, tradução nossa). Conseqüentemente, o projeto prevê o desenvolvimento de três submodelos, relacionados respectivamente à formulação, à avaliação e à geração de planos urbanos e articulados por meio de uma ontologia<sup>22</sup>, que visa à unificação destes submodelos.

O primeiro submodelo diz respeito à formulação de problemas urbanos e estabelece suas fundações na linguagem de padrões de Alexander et al (1977), partindo de diretrizes de projeto existentes e de bases de dados geoespaciais para a criação de um sistema que possibilite gerar as especificações de um plano urbano. Para isto, o sistema leva em consideração tanto as características físicas do local como as características socioeconômicas de sua população, definindo as especificações programáticas para este contexto.

O segundo submodelo visa a criar um sistema para gerar soluções alternativas de projeto a partir de uma linguagem genérica de design urbano que é progressivamente restringida e manipulada ao longo do processo de projeto - o modelo de geração. Este submodelo examina as gramáticas descritivas e da forma de Stiny & Gips (1972) para codificar as regras de sintaxe de um plano

---

<sup>22</sup> De acordo com Gruber (1993), ontologia consiste na representação formal de conceitos, a partir de domínios reais ou imaginados, e das relações entre eles.

em questão, de maneira a gerar soluções que correspondam às especificações definidas pelo sistema e sejam apropriadas para o contexto de um projeto dado.

O terceiro submodelo tem como alvo o desenvolvimento de um sistema (ou modelo) de avaliação de projeto urbano. Este submodelo toma como ponto de partida a teoria da sintaxe espacial de Hillier & Hanson (1984), que foca principalmente em configurações espaciais topológicas e geométricas, incorporando-as “a teorias de formas urbanas sustentáveis, como a cidade compacta” (DUARTE et al, 2012, p.83, tradução nossa). Este submodelo é orientado a abordar aspectos sociais, ambientais e de infraestrutura, por meio da aplicação de uma gama de técnicas de análise espacial, incluindo análise de rede, *data mining*<sup>23</sup> e reconhecimento de padrões. Seu objetivo principal é o de fornecer uma base para comparar e classificar soluções alternativas para planos urbanos.

Neste sentido, o projeto *City Induction* objetiva o desenvolvimento de modelos computacionais para suporte em três frentes de trabalho: tarefas de formulação, geração e avaliação de planos urbanos, conforme sintetizado na Figura 11.

---

<sup>23</sup> *Data mining* é um subcampo interdisciplinar da ciência da computação, que consiste em um processo computacional para a descoberta de padrões em grandes conjuntos de dados, por meio de métodos de inteligência artificial, estatísticas e sistemas de banco de dados.

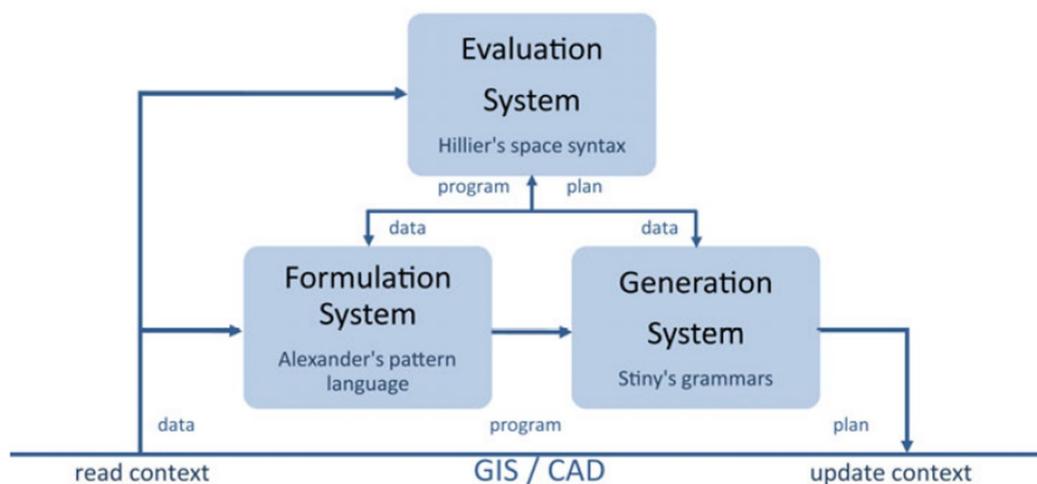


Figura 11. Estrutura conceitual básica do projeto *City Induction*, desenvolvimento de modelos integrados para a formulação, a geração e a avaliação de planos urbanos. Fonte: Duarte et al (2012, p. 84)

Assim, o modelo de aplicação computacional preconizado por Duarte et al (2012) consiste em três submodelos, concebidos para serem avaliados por meio de provas de conceito<sup>24</sup> e para trabalhar integradamente por meio de uma ontologia que permita descrever os conceitos e as operações referentes a cada submodelo. Esta ontologia é pretendida para funcionar como um protocolo de comunicação entre os três submodelos elaborados, objetivando unificá-los em um modelo geral comum que visa a fornecer: a) um submodelo para a formulação de programas urbanos focado na análise e interpretação do contexto, para a geração de especificações para planos urbanos com base em características da comunidade e do local em questão; b) um submodelo para a geração de planos urbanos para produzir soluções de projeto adaptadas, em resposta a variações em contextos urbanos, e; c) um modelo de avaliação que permita analisar,

<sup>24</sup> Prova de conceito é um termo utilizado para designar um modelo prático que pretende comprovar um conceito (ou teoria) em uma investigação. Pode se referir também a uma implementação, resumida ou incompleta, de um sistema ou de uma ideia, realizada para verificar se o conceito ou a teoria em questão é suscetível de ser explorado (a) de maneira útil.

comparar e classificar planos urbanos alternativos. O projeto *City Induction* possui ainda como desdobramentos as pesquisas de doutoramento (e, conseqüentemente, os modelos de aplicação computacional) desenvolvidas por Beirão (2012) e Montenegro (2015), que serão examinados em seqüência.

### 2.2.2. *CItyMaker* - modelo de Beirão (2012)

Em sua tese de doutoramento intitulada “*CItyMaker*”, Beirão (2012) concentra-se no desenvolvimento de ferramentas generativas para contextos urbanos, em um desdobramento do projeto de pesquisa *City Induction* mais diretamente orientado a tarefas de desenho<sup>25</sup>. Este sistema abrange um método que utiliza ferramentas baseadas em gramáticas da forma<sup>26</sup> (Stiny & Gips, 1972) e se materializa por meio de um modelo teórico para uma ferramenta de projeto urbano (também denominada *CItyMaker*) verificada sob a forma de duas implementações de protótipos, como prova de conceito.

Em síntese, Beirão (2012) apresenta um sistema para gerar soluções alternativas para um determinado contexto urbano. Este sistema propõe a combinação de um conjunto de padrões de design, por meio da “codificação de movimentos tipicamente utilizados em tarefas de projeto

---

<sup>25</sup> Enquanto os modelos de formulação e de avaliação previstos no contexto de investigação do *City Induction* se relacionam mais especificamente ao escopo do planejamento urbano, o trabalho de Beirão (2012) possui maior correspondência com o desenho urbano (Beirão, 2012).

<sup>26</sup> A Gramática da forma consiste, simplificada, em um conjunto de regras de transformação de formas que podem ser aplicadas de maneira recursiva, a partir de uma forma inicial, um conjunto ou uma linguagem de formas (Stiny & Gips, 1972).

urbano” (BEIRÃO, 2012, p. 13, tradução nossa). A combinação de padrões objetiva obter diferentes layouts, que podem ser ajustados por meio da manipulação de diversos parâmetros, considerando vários indicadores. Ainda segundo Beirão (2012), os padrões implementados foram desenvolvidos a partir da observação de procedimentos típicos de projeto urbano, codificados como gramáticas discursivas<sup>27</sup> e posteriormente traduzidos em padrões de projeto em ambiente algorítmico-paramétrico.

Deste modo, o sistema e as ferramentas de *CIttyMaker* permitem que a composição das soluções de um dado projeto se dê a partir de um conjunto de premissas programáticas. Assim, as soluções podem ser dinamicamente modificadas de acordo com a alteração de parâmetros, ao mesmo tempo em que é possível verificar as mudanças nos indicadores urbanos referentes a cada solução avaliada. A Figura 12 ilustra a utilização de *CIttyMaker* em contexto algorítmico-paramétrico, sob a plataforma do *plugin* Grasshopper, para Rhinoceros.

---

<sup>27</sup> A teoria da gramática da forma permite estabelecer duas abordagens básicas: as gramáticas generativas e as gramáticas discursivas. Enquanto as gramáticas generativas podem ser utilizadas na geração automática de formas, as gramáticas discursivas podem ser empregadas como um processo analítico, que permite descrever as regras subjacentes à geração de um determinado projeto.

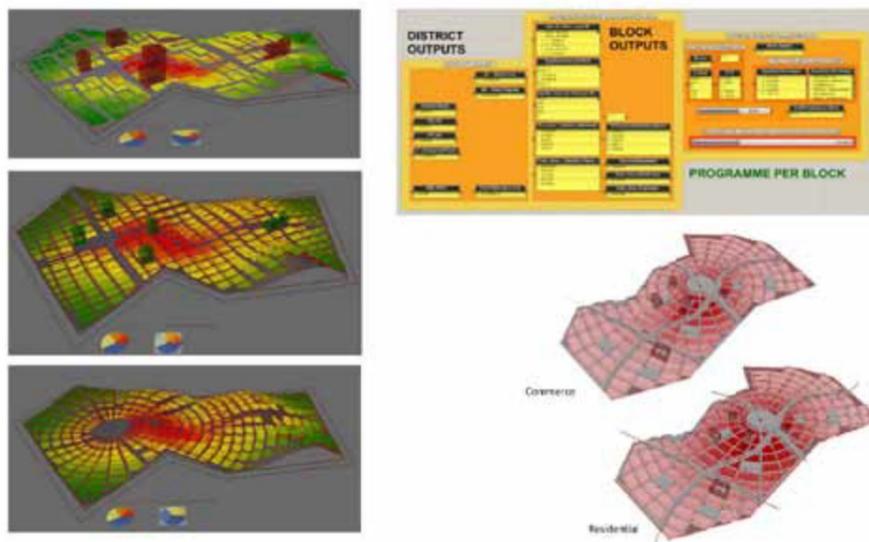


Figura 12. Prova de conceito de *CItYMaker* elaborada por Beirão (2012). As três imagens à esquerda mostram três grelhas possíveis. O canto superior direito mostra a interface de saída de dados em que os indicadores de densidade são mostrados na escala do distrito, na escala da quadra e por quadra. O canto inferior direito mostra a distribuição dos usos comercial e residencial no plano proposto. Fonte: Beirão (2012, p. 213).

### 2.2.3. *CityPlan* - modelo de Montenegro (2015)

Montenegro (2015), em sua tese de doutoramento intitulada *CityPlan*, propõe “o desenvolvimento de um modelo para a formulação de programas urbanos, que inclui a criação de um sistema e de uma ferramenta informática associada” (p.3). Este modelo, que também se enquadra no contexto de investigação mais amplo que contém o projeto *City Induction*, consiste no que Montenegro (2015) define como uma “plataforma modular para a criação de soluções flexíveis de planeamento, que incorpora um fluxo de trabalho e funções que permitem uma rápida alteração de *standards* de classificação de entidades urbanas” (p. 29). Em síntese, *CityPlan* pode ser definido como um sistema de informação geográfica orientado por ontologias, que visa a permitir a identificação e classificação de dados geoespaciais, bem como a localização automática de um conjunto de equipamentos públicos coletivos, de acordo com regras de

localização pré-definidas. Em particular, o modelo proposto engloba duas estruturas principais de conhecimento que funcionam interligadas, conforme ilustra a Figura 13.

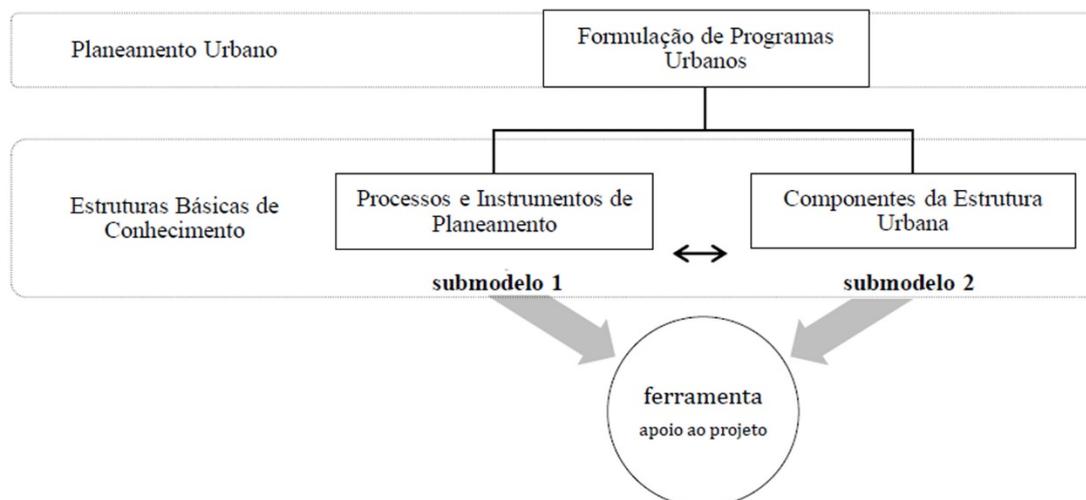


Figura 13. Modelo global proposto por Montenegro para a formulação de programas urbanos e o desenvolvimento de uma ferramenta de apoio ao projeto com este fim. Fonte: Montenegro (2015, p. 72)

Desta forma, uma vez identificados os requisitos principais de um determinado plano urbano, torna-se possível obter “um conjunto básico de recomendações adequadas para dar suporte à elaboração de estratégias de programação espacial e ao desenvolvimento de alternativas consistentes para o desenho urbano” (MONTENEGRO, 2015, p.3).

A tese de Montenegro (2015) traz ainda uma outra importante contribuição para o desenvolvimento desta investigação: a implementação de testes de validação para avaliar uma sistema e/ou ferramenta. O modelo proposto por Montenegro passou por uma validação prática, por meio de um *workshop*<sup>28</sup> em que participantes particularmente interessados no

<sup>28</sup> A avaliação de CityPlan ocorreu no contexto do seminário internacional intitulado *Measuring Urbanity: densities, networks and urban fabrics* e do *workshop internacional - City Induction: urban design with patterns and rules*

desenvolvimento de técnicas avançadas em desenho urbano paramétrico e em sistemas baseados em conhecimento permitiram “recolher dados decorrentes da utilização de *CityPlan* em contexto real, para melhorar a compreensão acerca dos diversos níveis de funcionalidade da ferramenta” (MONTENEGRO, 2015, p.141). Esta é uma possibilidade interessante para esta investigação, uma vez que a avaliação de diferentes usuários pode permitir apreender importantes informações acerca da funcionalidade do sistema e das ferramentas que se objetiva elaborar.

#### 2.2.4. *Configurbanist* - modelo de Nourian et al (2015)

Em um artigo que descreve resultados parciais referentes à investigação de doutoramento de Pirouz Nourian<sup>29</sup>, para a conferência eCAADe (*Education and research in Computer Aided Architectural Design in Europe*) 2015, Nourian et al (2015) apresentam um conjunto de ferramentas algorítmico-paramétricas associadas denominado *configurbanist*. Segundo Nourian et al (2015), este modelo possui como objetivo contribuir para o desenvolvimento de um método abrangente “para análise de redes urbanas, considerando aspectos cognitivos e físicos

---

(*Measuring Urbanity*), realizado em Lisboa, de 7 a 12 maio de 2012, na Faculdade de Arquitetura da Universidade de Lisboa.

<sup>29</sup> Pirouz Nourian defendeu sua tese de doutoramento com o título “*Configraphics*” na TU Delft, em setembro de 2016. Em sua tese estão descritas e analisadas as funcionalidades de *configurbanist* entre outras ferramentas desenvolvidas.

relacionados às atividades de caminhar e do ciclismo, em relação à configuração espacial urbana, sob aspectos físicos e topológicos” (NOURIAN et al, 2015, p.554, tradução nossa).

Este modelo de aplicação computacional é alvo de especial interesse desta pesquisa porque além de possuir grande correspondência com o escopo desta tese (mais especificamente no que diz respeito ao cálculo de medidas relativas à caminhabilidade – por meio de medidas físicas e topológicas), se desenvolve no contexto da lógica algorítmico-paramétrica, de maneira a permitir que algumas de suas funcionalidades sejam incorporadas e combinadas às ferramentas e ao sistema a serem elaborados nesta tese. A seção seguinte identifica uma série de funcionalidades algorítmico-paramétricas que podem ser utilizadas no sistema referente a esta investigação.

### 2.3. Funcionalidades algorítmico-paramétricas para formulações urbanas

A presente subseção visa a identificar e descrever funcionalidades algorítmico-paramétricas<sup>30</sup> potencialmente úteis ao contexto de implementação computacional na esfera urbana e, mais especificamente, à elaboração do sistema e das ferramentas a serem desenvolvidas no escopo desta tese. Isto é, serão descritos aqui componentes que se relacionam ao cenário propositivo desta investigação em duas situações: a) podem ser conjugados em abordagens que utilizem o sistema e as ferramentas propostas, de maneira a contribuir para o seu funcionamento, ou; b) podem ser incorporados (ou adaptados) na programação de parte das ferramentas propostas, tendo em vista sua afinidade com os objetivos desta pesquisa. Estas funcionalidades estão organizadas de acordo com o propósito de sua utilização, seguindo a seguinte classificação: *plugins* para obtenção de dados, *plugins* de abordagem métrica e *plugins* de otimização.

#### 2.3.1. *Plugins* para obtenção de dados

Obter os dados referentes a uma área urbana que se pretenda avaliar é uma tarefa de grande importância no contexto do planejamento urbano. A quantidade e qualidade destas informações são fatores determinantes para a confiabilidade das operações realizadas e dos resultados

---

<sup>30</sup> Serão designadas, no contexto desta investigação, como funcionalidades algorítmico-paramétricas os componentes (ou ferramentas) já existentes e identificados como potencialmente úteis ao desenvolvimento do sistema e das ferramentas a serem elaboradas no contexto desta tese. Assim, serão aqui consideradas apenas as funcionalidades compreendidas na lógica algorítmico-paramétrica (mais especificamente aquelas compatíveis com o *software* Grasshopper, da plataforma do Rhinoceros, que será alvo de mais especificações no Capítulo 3) que possam ser combinadas ou incorporadas às ferramentas a serem desenvolvidas nesta investigação.

obtidos. Neste sentido, estarão aqui identificadas ferramentas que possibilitem lidar mais dinamicamente com informações a respeito de áreas urbanas e que podem ser importantes no desenvolvimento desta pesquisa.

Para além dos métodos tradicionais de gerenciamento de informações urbanas, como Sistemas de Informação Geográfica (SIG) e arquivos CAD - que podem ser importados para uso em diversas plataformas - dados vetoriais de uma determinada área de interesse podem ser compatibilizados com ambientes algorítmico-paramétricos por meio de *plugins* como *Elk* ou *Mosquito*, que incorporam dados a partir de plataformas como *GoogleMap* ou *Open Street Maps*<sup>31</sup>. O *Open Street Maps* é um projeto colaborativo que disponibiliza mapas editáveis de uso livre e licença aberta, e que fornece um arquivo de extensão .OSM de qualquer região geográfica selecionada (TEDESCHI, 2014). Arquivos de extensão .OSM podem ser importados para a interface do *software* Grasshopper, por meio do *plugin* Elk, que permite gerar mapas e superfícies topográficas utilizando dados de código aberto e que possibilita organizar entidades geométricas de acordo com determinadas categorias (FOOD4RHINO, 2016). Assim, é possível referenciar parametricamente pontos de interesse de diferentes naturezas, como: paradas de transporte, linhas férreas, vias de automóvel, edifícios, diferentes serviços urbanos, entre outros (ver Figura 14).

---

<sup>31</sup> <http://www.openstreetmap.org>



Figura 14. Parte da cidade de Juiz de Fora, Minas Gerais, vista na interface do *Open Street Maps* (acima) e no modelo importado pelo Elk para o Grasshopper (abaixo). Fonte: O autor.

Entretanto, o nível de informações e geometrias disponíveis nesta plataforma (desenho das edificações em 2D e 3D, classificação de diferentes categorias, entre outros) ainda varia de acordo com diferentes cidades. Em grandes centros mundiais como Nova York ou Londres, a quantidade de informações é consideravelmente superior à de cidades de menor porte, como Juiz de Fora-MG, por exemplo. Esta é uma limitação importante de ferramentas com base *Open*

*Source*, mas que tende a ser superada com o tempo, conforme mais usuários e órgãos forem alimentando o sistema. Assim, ferramentas para obtenção de dados urbanos como Elk, Mosquito e *Slingshot*<sup>32</sup>, possuem grande potencial para ser conjugadas em abordagens de planejamento, de maneira a facilitar o gerenciamento de informações urbanas, apesar de ainda não estarem plenamente compatibilizadas.

### 2.3.2. *Plugins* de abordagem métrica

Esta investigação propõe a utilização de duas referências de cálculo para a avaliação da distância (uma variável crucial) no contexto do DOT: a distância física – que se pode aferir por meio do comprimento da trajetória que se precisa percorrer para atingir um determinado destino – e a distância topológica, que considera quantas mudanças de direção (ou de ruas) são necessárias para se atingir esta mesma localidade. Não se pretende aqui priorizar uma métrica em detrimento da outra, pelo contrário, é importante considerar ambas, de maneira que elas se complementem em diferentes tarefas e análises.

Por exemplo, como mensurar qual trajeto proporciona maior proximidade em uma determinada situação urbana: caminhar 500m passando por quatro ruas, ou caminhar 510m passando por

---

<sup>32</sup> *Slingshot* é um *plugin* para Grasshopper que oferece suporte para criar, modificar e atualizar bancos de dados como MySQL, ODBC e OLE DB (FOOF4RHINO, 2016). Além disso, trabalha com base em coordenadas geográficas, enquanto o Grasshopper considera coordenadas euclidianas. Sendo assim, são necessárias algumas transposições (muitas vezes manuais) para compatibilizar estes dois sistemas de coordenadas distintos.

apenas duas? Considerar apenas uma destas métricas isoladamente seria a melhor abordagem para aferir a proximidade entre dois locais?

É possível mensurar a proximidade de um determinado local considerando estas duas métricas, que podem, por exemplo, ser utilizadas como diferentes objetivos a serem abordados em uma tarefa de otimização<sup>33</sup> multicritério. Isso significa considerar não apenas o comprimento de um trajeto para determinar a distância entre dois pontos, mas abordar também as mudanças de direção que ocorrem em um determinado percurso, o que também possui implicações na maneira como as pessoas se deslocam nas cidades.

Esta subseção descreve ferramentas do Grasshopper que podem ser utilizadas para abordar métricas físicas ou topológicas, no cálculo da proximidade entre dois pontos de interesse e que podem incorporados às ferramentas propostas, em abordagens voltadas para o DOT ou para tarefas de planejamento e projeto de natureza semelhante. São elas: ShortestWalk, Cheetah e Syntatic.

- **ShortestWalk**

O ShortestWalk é um componente do Grasshopper que se baseia no algoritmo de busca A\*<sup>34</sup> e que foi utilizado na programação de algumas ferramentas de CityMetrics. Este componente, considera uma rede de linhas e curvas como base para calcular a rota mais curta entre um ponto

---

<sup>33</sup> O conceito de otimização enquanto uma estratégia desta investigação será mais profundamente abordado no Capítulo 3. Não obstante, *plugins* de otimização serão identificados, ainda neste capítulo, como funcionalidades potencialmente úteis no contexto desta investigação.

<sup>34</sup> Na ciência da computação, A\* (pronunciado como "A estrela") é um algoritmo amplamente utilizado em *pathfinding* e travessia de gráfico, o processo de traçar um caminho eficiente entre vários pontos, chamados de nós.

de partida e um de destino (FOOD4RHINO, 2016). Ou seja, o ShortestWalk permite calcular o trajeto de menor distância física entre dois pontos de interesse em uma determinada localidade, considerando a rede de ruas disponível para este percurso. A incorporação deste componente nos códigos de algumas ferramentas pode ser importante para conferir maior precisão ao cálculo dos percursos. A Figura 15 ilustra diferentes situações em que se empregou este componente.

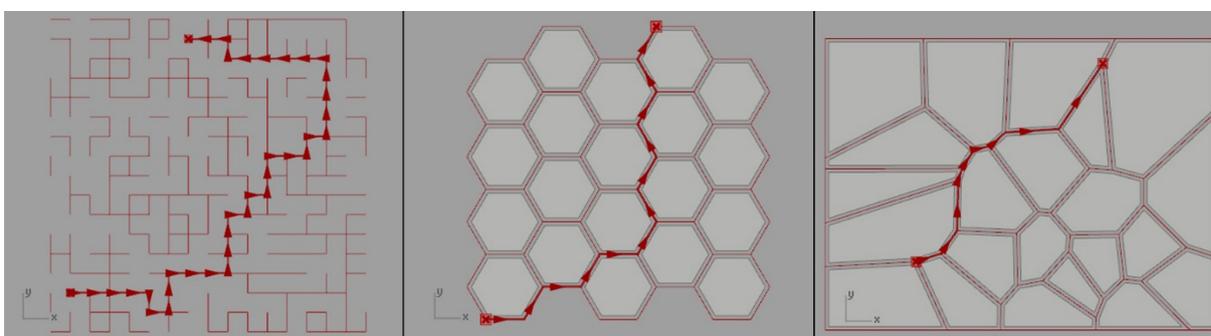


Figura 15. Utilização do ShortestWalk para cálculo do menor trajeto entre dois pontos em diferentes situações. Fonte: Food4Rhino (2016).

- ***Cheetah - the configurbanist***

O *plugin* Cheetah - the configurbanist consiste em um conjunto de ferramentas para Grasshopper, ainda em desenvolvimento<sup>35</sup>, e direcionado à análise computacional de configurações urbanas, particularmente orientadas para questões relacionadas à caminhabilidade e ao ciclismo (NOURIAN et al, 2015). Este *plugin*, que aborda métricas físicas e emprega

---

<sup>35</sup> Apesar de ainda se encontrar em desenvolvimento, o *plugin* Cheetah (desenvolvido por Pirouz Nourian e Samaneh Rezvani da Faculdade de Arquitetura da Universidade de Delft) já se encontra disponibilizado em sua segunda versão para download e utilização no portal <http://food4rhino.com>. Este *plugin* se refere ao modelo proposto por Nourian et al (2015) apresentado anteriormente.

também conceitos da sintaxe espacial, conta com diversos componentes que utilizam funcionalidades que podem ser associadas às ferramentas e ao sistema proposto no contexto desta investigação.

Cheetah apresenta componentes como *proximity* e *vicinity*, que permitem calcular as distâncias agregadas entre um lote e todos os pontos de interesse de uma determinada área ou apenas para algumas localidades específicas. Segundo Nourian et al (2015) *proximity* informa quão próximo um determinado local está de todos os pontos de interesse de uma determinada área urbana, enquanto *vicinity* permite verificar o quão perto este mesmo local está de um destino de interesse. O componente *catchment areas*, permite visualizar quais localidades são acessíveis a partir de um determinado endereço, de acordo com o tempo que se pretenda dispende e o modo (a pé ou de bicicleta) que se pretenda realizar o deslocamento (ver Figura 16).

Cheetah possibilita ainda organizar uma determinada região em subáreas, de acordo com a posição e a área de influência de seus pontos de interesse (ou centralidades), em um cálculo que utiliza princípios do diagrama de voronoi<sup>36</sup>.

---

<sup>36</sup> O Diagrama de Voronoi organiza um dado espaço em polígonos ou células, que possuem seus respectivos centros. Estas células são configuradas de tal maneira que um ponto que esteja contido em uma célula, sempre estará mais próximo do centro de sua célula, do que de qualquer outro.

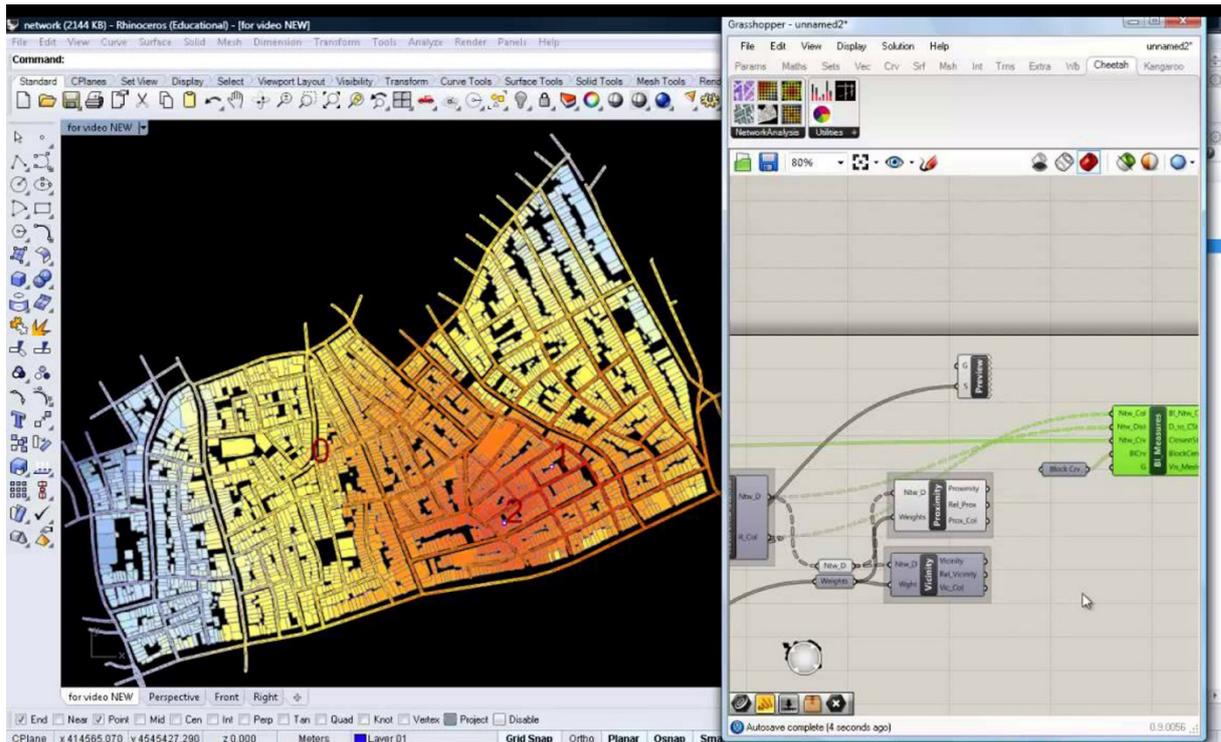


Figura 16. O *plugin Cheetah-The configurbanist* em funcionamento. Fonte: Pirouznourian (2016).

Conforme afirmado, algumas das funcionalidades de *Cheetah* possuem similaridades com as ferramentas que se pretende desenvolver nesta pesquisa. Entretanto, em função de peculiaridades dos princípios do DOT, de especificidades do sistema que será apresentado no próximo capítulo (construção de sistemas generativos e especificação de funções-objetivo para otimização), e da necessidade de configurações específicas de parte das ferramentas, pretende-se formular ferramentas independentes e complementares às de *Cheetah*, o que não exclui a possibilidade de incorporação de algumas destas funcionalidades em abordagens que empreguem o sistema proposto.

- *Syntatic*

O *plugin Syntatic* para o Grasshopper permite acessar medidas da teoria da sintaxe espacial em modelos paramétricos (PIROUZNOURIAN, 2016). Este *plugin* apresenta componentes que podem ser utilizados na formulação de algumas das ferramentas propostas para cálculo de medidas sintáticas como integração e conectividade (ver Figura 17). Isso significa dizer que a incorporação de tais recursos possibilita mensurar a quantidade de espaços diretamente conectados a um outro determinado espaço de interesse. *Syntatic* permite ainda calcular a distância topológica – o número de passos (ou mudanças de direção) necessários para acessar um determinado espaço, considerando uma rede de ruas fornecida. Este *plugin* pode ser utilizado para fornecer a base para análises de métrica topológica no contexto metodológico desta pesquisa.

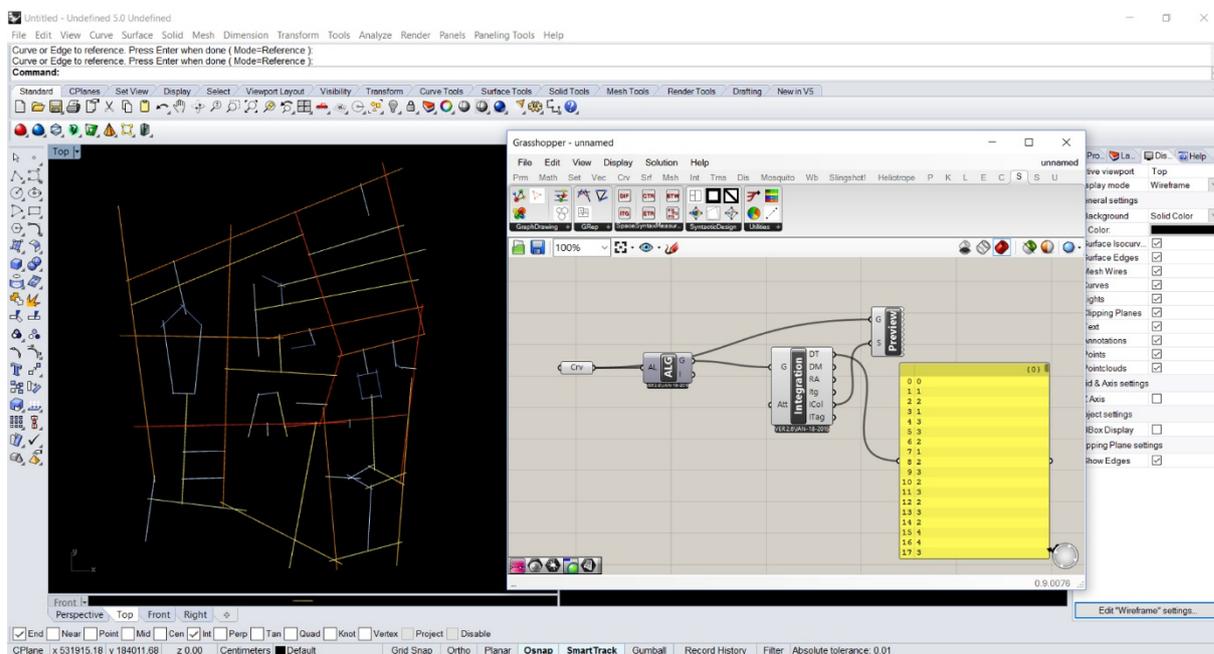


Figura 17. Avaliações de medidas sintáticas por meio de *Syntatic*. Fonte: O autor.

### 2.3.3. *Plugins* para otimização

Dentre os *plugins* do Grasshopper que realizam tarefas de otimização, dois foram alvo de especial atenção nesta pesquisa e possuem potencialidade para serem incorporados em abordagens desenvolvidas nesta investigação: Galapagos e Octopus. Ambos são ferramentas que utilizam princípios evolutivos para a resolução de problemas e, portanto, permitem procurar soluções de uma maneira mais dinâmica (TEDESCHI, 2014). No entanto, enquanto o Galapagos considera apenas uma única função objetivo para otimização, o Octopus se enquadra na lógica da otimização multicritério, ou multi-objetivo, permitindo abordar várias questões simultaneamente (FOOD4RHINO, 2016).

Esta diferença essencial entre os dois *plugins* se reflete não apenas na variedade de respostas que cada um fornece, mas também na maneira como as soluções são apresentadas e, principalmente, na estrutura algorítmica que um sistema generativo deve possuir em função da ferramenta adotada. Ou seja, o otimizador utilizado na solução de um determinado problema possui influência direta na estruturação do código para abordar esta determinada situação. Enquanto o Galapagos fornece um *ranking* de soluções ótimas, decrescentemente recomendadas de acordo com as condições pré-estabelecidas, o Octopus apresenta suas soluções sob a forma de gráficos e considerando a fronteira de Pareto<sup>37</sup>, o que significa que todas as soluções fornecidas neste contexto devem ser consideradas igualmente satisfatórias – pelo menos sob a perspectiva de critérios objetivos.

---

<sup>37</sup> O termo fronteira de Pareto, bem como outros aspectos referentes ao conceito de otimização, serão mais profundamente abordados no Capítulo 3.

Neste sentido, a otimização multicritério demonstra possuir potencialidades mais interessantes de implementação no contexto do projeto urbano e, mais especificamente, no âmbito do DOT. Além de permitir abordar vários objetivos simultaneamente, a otimização multicritério fornece espaço para discussões entre os diversos atores envolvidos em processos de projeto, possibilita a priorização de um aspecto em detrimento de outro e, ainda assim, fornece soluções ótimas. A Figura 18 e a Figura 19 apresentam as interfaces de resultados do Galapagos e do Octopus, respectivamente.

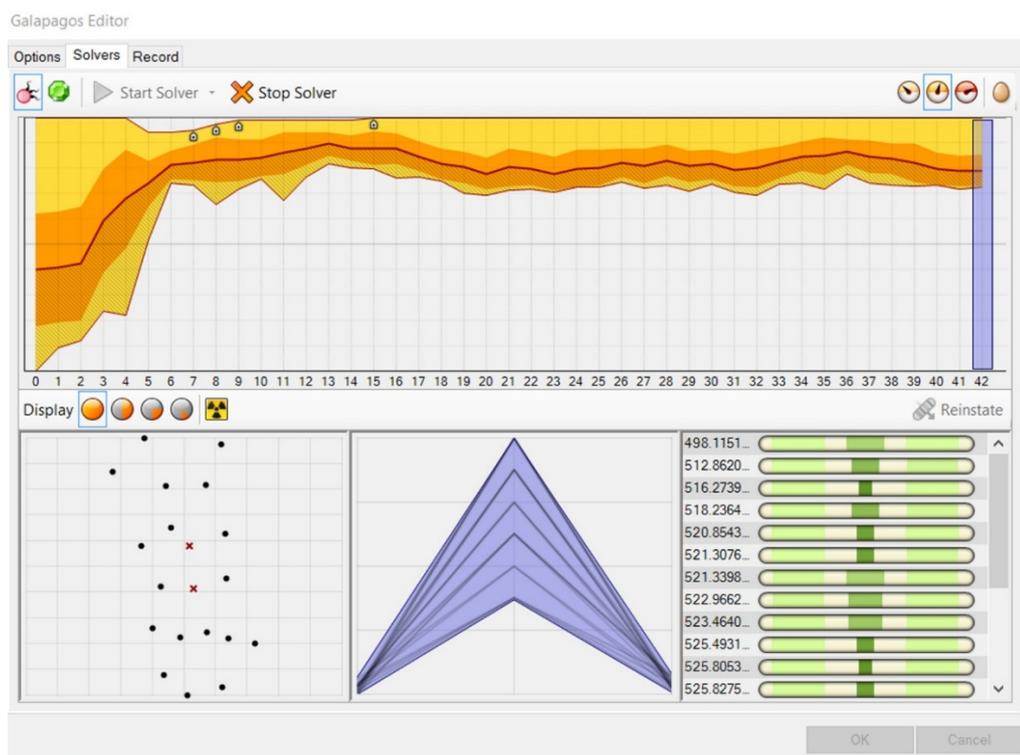


Figura 18. Interface de resultados do Galapagos. Na parte inferior direita, a apresentação das soluções hierarquizadas de acordo com o atendimento ao critério pré-estabelecido. Fonte: O autor.

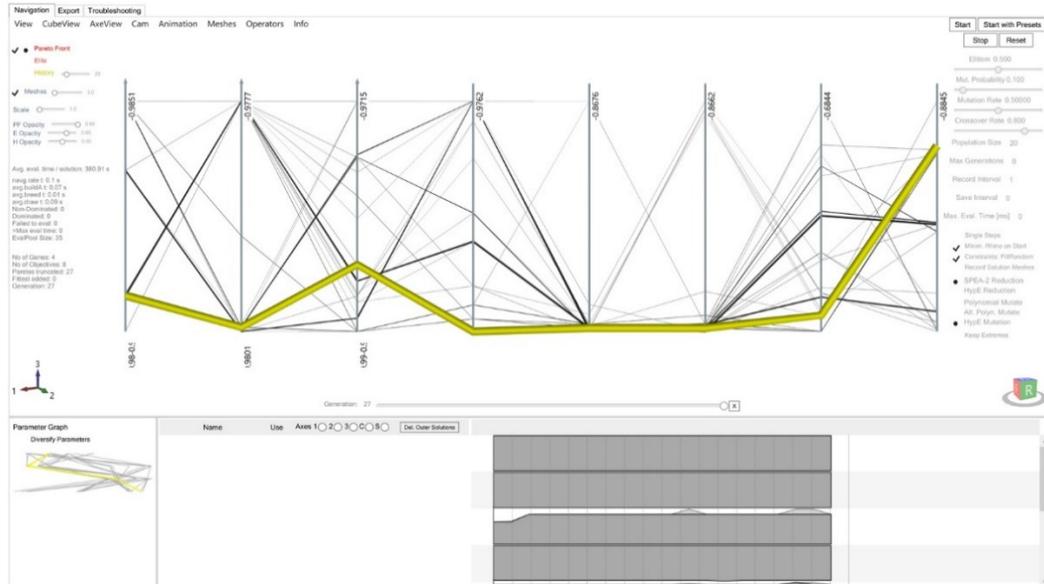


Figura 19. Interface de resultados do Octopus: Cada eixo representa uma função objetivo e cada linha que passa por estes eixos representa uma solução de pareto. Em amarelo, uma solução selecionada. Fonte: O autor.

#### 2.4. Reflexões sobre aplicações computacionais no contexto urbanístico

Apesar de ainda não se encontrarem tão frequentemente implementadas como no campo específico da arquitetura, aplicações computacionais em contexto urbanístico (mais especificamente aquelas relacionadas à lógica algorítmico-paramétrica) têm sido crescentemente desenvolvidas, uma vez que os componentes constituintes de um bairro ou de uma cidade também compartilham similaridades que podem ser definidas parametricamente. Os modelos elaborados por Duarte et al (2012), Beirão (2012), Montenegro (2015) e Nourian et al (2015), além de confirmarem a grande potencialidade da aplicação computacional em situações urbanas, possuem em comum o fato de se apresentarem sob a forma de sistemas, conforme também objetiva esta investigação. Entretanto, o modelo computacional relativo a esta tese apresenta a peculiaridade de avançar na implementação algorítmico-paramétrica de atributos de avaliação de desempenho em tarefas de análise e otimização de configurações geométricas urbanas, visando a tornar estas tarefas mais dinâmicas e eficientes, suportando a tomada de decisão em processos de projeto urbano.

O modelo proposto por Duarte et al (2012) toma por base diferentes teorias para seu desenvolvimento em diferentes frentes (formulação, geração e avaliação), em um fluxo que parte de aspectos teóricos (como o conceito de cidade compacta, por exemplo) em direção à formulação de um modelo. Duarte et al (2012) e Beirão (2012) utilizam provas de conceito para verificar a implementação de seus sistemas, enquanto Montenegro (2015) avalia sua ferramenta por meio de um *workshop* onde diversos utilizadores forneceram informações acerca da funcionalidade de *CityPlan*.

Além disso, Beirão (2012) e Nourian et al (2015) utilizam recursos algorítmico-paramétricos em seus modelos, sendo que algumas das ferramentas desenvolvidas por Nourian et al (2015), bem como outras que também foram identificadas neste capítulo, possuem potencialidade para serem combinadas ou incorporadas ao sistema e ao conjunto de ferramentas desenvolvidas nesta investigação, que serão apresentados no próximo capítulo.

**Capítulo 3 | CITYMETRICS - Sistema (para)métrico para análise e otimização de configurações urbanas de acordo com métricas de avaliação de desempenho**

“approaches which allow scenarios to be easily tested and modified without the application of complex and expensive technologies and accompanying levels of skill are very appropriate in urban design”

**Nicolai Steino**

Este capítulo visa a caracterizar e a descrever as bases relativas ao cerne desta investigação: a elaboração de um sistema algoritmo-paramétrico<sup>38</sup> (e de um conjunto de ferramentas associado) para suporte em tarefas de análise e otimização de configurações geométricas do espaço urbano, com base em métricas<sup>39</sup> de avaliação de desempenho.

Assim, neste capítulo será realizada uma breve apresentação do termo que designa o sistema proposto, bem como serão expostas as estratégias computacionais que suportam seu conceito e desenvolvimento, com uma descrição detalhada das métricas adotadas e das ferramentas elaboradas para avaliação de desempenho de configurações urbanas, de acordo com princípios mensuráveis do Desenvolvimento Orientado pelo Transporte (DOT).

---

<sup>38</sup> O sentido específico de aplicação do termo “algorítmico-paramétrico” no contexto desta investigação foi detalhado no Capítulo 2.

<sup>39</sup> Comumente, o conceito de métrica se relaciona ao ritmo de um poema ou à noção de distância em contexto matemático, ou ainda, a uma notação relativa ao compasso de uma música. Portanto, em essência, o termo “métrica” pode ser utilizado para se referir a critérios ou parâmetros utilizados para se aferir ou medir algo. No contexto desta investigação, este termo está utilizado para designar diferentes referências que permitem mensurar o grau de eficiência e as possibilidades de operação de configurações urbanas.

### *3.1. A designação CityMetrics*

Conforme afirmado anteriormente, o sistema proposto visa a utilização de referências de cálculos (relativas a princípios objetivamente mensuráveis de teorias existentes) para a formulação de métricas geométricas e algébricas, visando a avaliar e a otimizar o desempenho de configurações de espaços urbanos. Ou seja, essencial e simplificada, esta investigação se desenvolve ao redor da ideia da implementação computacional de métricas urbanas enquanto parâmetros de análise e otimização de desempenho. Neste sentido, com o objetivo de facilitar a divulgação e a assimilação desta investigação no contexto internacional científico de aplicações computacionais voltadas ao espaço urbano, bem como de propor uma nomenclatura que possa sintetizar o conceito e se referir ao sistema (e ao conjunto de ferramentas) proposto, foi adotado o termo em inglês “CityMetrics” para a designação do sistema que será apresentado neste capítulo.

### 3.2. Estratégias computacionais para a formulação de CityMetrics

A formulação de ferramentas específicas - e de um sistema que utilize recursos algorítmico-paramétricos para implementação em tarefas de suporte ao planejamento urbano - implica em (além dos aspectos especificamente relacionados a questões urbanas) um aprofundamento em estratégias computacionais que permitam que a experimentação e a concatenação de atributos, princípios e regras se deem de maneira dinâmica, interoperacional e eficiente. A presente subseção visa a identificar estratégias computacionais<sup>40</sup> potencialmente úteis para serem empregadas na elaboração do sistema e do conjunto de ferramentas desenvolvidos no contexto desta investigação. Aqui estão descritas as características fundamentais e a aplicação metodológica na qual estas estratégias se inserem, bem como suas lógicas de desenvolvimento e utilização.

#### 3.2.1. Linguagem de Programação Visual (LPV)

Para executar procedimentos algorítmicos no computador, é necessário um editor de algoritmos específico, por meio do qual serão construídas suas instruções de funcionamento. Editores algorítmicos operam em modo *standalone*<sup>41</sup>, ou ainda, incorporados a algum outro programa.

---

<sup>40</sup> O termo “estratégias computacionais”, no contexto desta investigação, se diferencia de termos como “ferramentas”, “funcionalidades” ou “instrumentos” computacionais. Enquanto os três últimos se referem a *software* ou *plugins* especificamente elaborados, o primeiro termo se refere a uma lógica de procedimento, em um contexto mais amplo. As estratégias computacionais que serão apresentadas nesta subseção se referem aos fundamentos empregados no desenvolvimento do sistema de análise e otimização proposto nesta investigação.

<sup>41</sup> Um aplicativo *standalone* é aquele que funciona independentemente de outro *software*.

Entre os editores autônomos encontram-se C#, Python, entre outros, sendo que os *software* AutoCAD e Rhinoceros, por exemplo, possuem editores incorporados que permitem aos seus usuários escrever códigos para automatizar algumas tarefas (TEDESCHI, 2014).

Segundo Tedeschi (2014), nos últimos anos foram desenvolvidas diversas ferramentas de interface visual cujo principal objetivo é tornar a programação mais simples e acessível. É o caso, por exemplo, dos editores gráficos de algoritmos Generative Components® e Grasshopper®, que se enquadram no conceito de *Visual Programming Language*.

Em computação, *Visual Programming Language* ou Linguagem de Programação Visual (LPV), pode ser definida como qualquer linguagem de programação que permita a seus usuários criar ferramentas através da manipulação de elementos graficamente, ao invés de especificá-los textualmente. A LPV objetiva aproximar profissionais como planejadores, arquitetos e designers do universo da programação, por meio de uma interface mais simplificada, que permite programar com expressões visuais, arranjos espaciais de texto e símbolos gráficos, utilizados como elementos de sintaxe ou notação secundária. Muitas LPVs são baseadas na ideia de caixas e setas, em que objetos de tela são tratados como entidades, ligadas por linhas ou arcos que representam as relações entre estas entidades.

Sendo assim, a utilização da LPV como estratégia para o desenvolvimento do sistema CityMetrics é de grande interesse, pois pode conferir uma maior simplicidade de operação, um maior público alvo e, conseqüentemente, uma maior acessibilidade. Neste contexto, ressalta-se ainda a opção por utilizar o *plugin* Grasshopper® (ver Figura 20), um editor gráfico de algoritmos integrado com as ferramentas de modelagem 3D do *software* Rhinoceros, com grande utilização no contexto internacional (GRASSHOPPER3D, 2016) e que se enquadra

no contexto do *open-source code*<sup>42</sup>, o que possibilita que o acesso e o intercâmbio de informações se deem de maneira ampla.

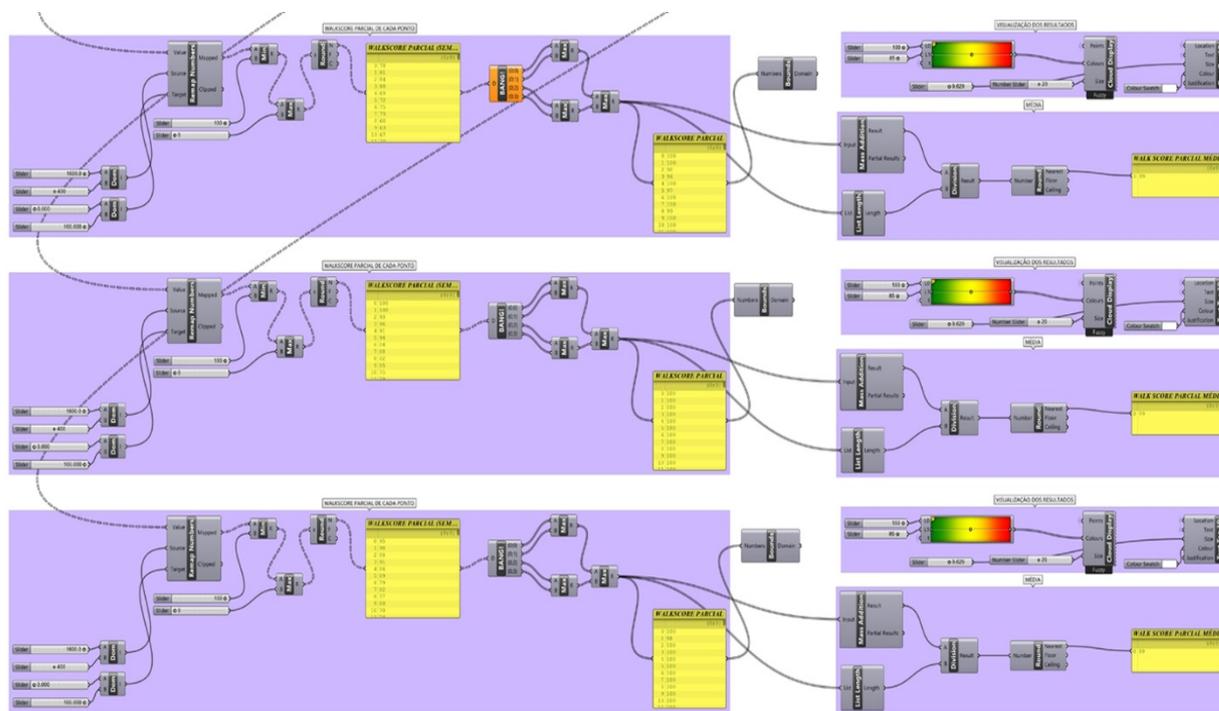


Figura 20. Exemplo de parte de algoritmo construído no Grasshopper. As relações entre as partes de um código se dão por meio de linhas que conectam os *outputs* de um componente e os *inputs* de outro. Estes códigos podem ainda ser combinados e compartilhados com códigos de outros usuários, pois estão inseridos na lógica de *open source*. Fonte: O autor.

### 3.2.2. Sistemas Generativos (SG)

Os Sistemas Generativos (SG), que Mitchell (1977) apresenta como mecanismos para produzir uma variedade de soluções potenciais, orientadas para a resolução de um dado problema, são

<sup>42</sup> *Open-source code* consiste em um *software* de computador com seu código fonte disponibilizado para estudo, modificação e distribuição. Um *software* de código aberto pode ser utilizado de forma pública e colaborativa. Este contexto é de grande importância para a elaboração, a divulgação e a implementação das ferramentas e do sistema proposto.

também uma importante estratégia no contexto de formulação do sistema proposto nesta investigação. Celani (2011) define Sistema Generativo como um método indireto de projeto, no qual o projetista não se preocupa apenas com a solução de um problema em particular em um contexto específico, mas também na construção dos parâmetros que compõem este sistema e em como as soluções serão obtidas. Nesta perspectiva, objetiva-se criar mecanismos mais ou menos genéricos, que possibilitem resolver problemas semelhantes em contextos diferentes. A Figura 21 ilustra esta relação.

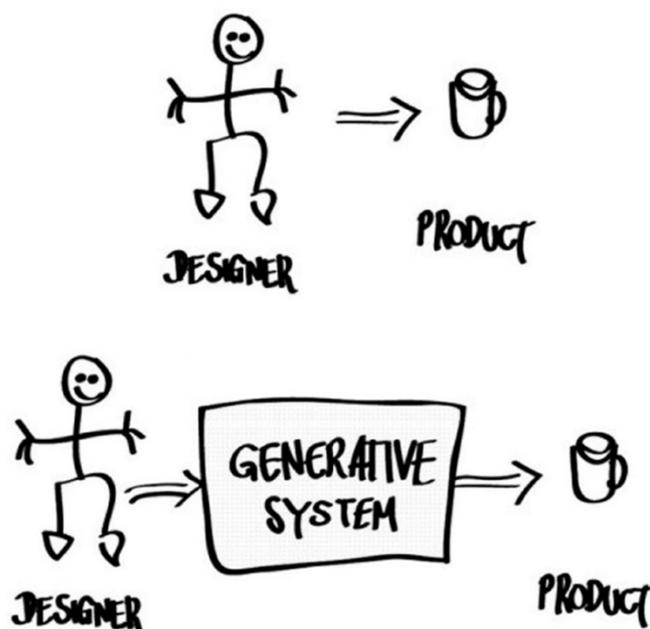


Figura 21. Diagrama de Fischer e Herr, comparando o conceito do processo “tradicional” ao conceito do processo generativo. Enquanto na primeira situação o foco se encontra no resultado, ou no produto, na abordagem generativa o foco está na produção dos mecanismos que irão gerar o resultado. Isso propõe importantes modificações na lógica de trabalho. Fonte: Celani (2011)

Khabazi (2012) define os SG como sistemas de desenho baseados em componentes generativos e utilizados em *software* paramétricos, enquanto Kolarevic (2005) acrescenta que os SGs são

aplicações computacionais de criação que utilizam algoritmos, parametrização, simulação e técnicas de otimização de desempenho. Esses aplicativos orientam a composição e organização a partir da avaliação das diferentes soluções, por meio de técnicas de simulação e da otimização progressiva das variáveis de desempenho, recorrendo a algoritmos orientados aos aspectos que se pretendem melhorar. Pode-se estabelecer assim, um sistema de suporte ao planejamento que inclui um *feedback* de desempenho na sua derivação organizacional, proporcionando objetivo e sentido que ultrapassam o campo estético. Esta abordagem inverte totalmente a lógica tradicional ao propor ciclos interativos de modelagem, simulação e avaliação. Adotar esta estratégia, significa estabelecer os objetivos que determinada tarefa se propõe a resolver e, em seguida, elaborar um conjunto de regras e restrições que definem a função que se deverá obedecer e o universo de possibilidades que o Sistema Generativo pode explorar. Finalmente, pode se introduzir um conjunto de soluções iniciais que serão progressivamente otimizadas, aproximando-se das metas de desempenho previamente estabelecidas.

Em síntese, um SG pode ser compreendido como uma estratégia algorítmica (pois funciona sob a perspectiva do atendimento a uma sequência de instruções), paramétrica (pois pode ser articulado por meio da variação de um ou mais parâmetros) e que tem por objetivo fornecer uma série de soluções diferentes de acordo com as variações de seus parâmetros geradores. Portanto, é possível estabelecer relações diretas entre a escolha dos parâmetros geradores de um sistema generativo e suas soluções, o que permite afirmar que os sistemas generativos são um caso potencial para utilização de otimização matemática.

### 3.2.3. Otimização matemática

A otimização matemática, ou simplesmente otimização, é uma estratégia chave adotada nesta pesquisa e que se refere à utilização de modelos algorítmico-paramétricos para resolução de um determinado problema, por meio da procura da melhor solução (ou da solução ótima) entre as alternativas possíveis de um sistema (TEDESCHI, 2014). Neste contexto, a otimização visa a minimizar ou maximizar uma função através da escolha sistemática dos valores de variáveis, dentro de um conjunto viável de soluções. Trata-se de uma abordagem para resolver problemas essencialmente quantitativos e que objetiva o suporte a processos de tomada de decisão.

Problemas de otimização, neste senso, podem ser estruturados, basicamente, por dois elementos: (a) a função objetivo, ou *fitness function*, e (b) as variáveis, ou *inputs*, que afetam diretamente o valor da função objetivo. Por exemplo, no contexto do Desenvolvimento Orientado pelo Transporte (DOT), uma possível função objetivo a ser adotada seria a distância entre uma estação de transporte e uma escola a ser implementada em um bairro. Neste problema, a localização desta escola hipotética (dentre os locais disponíveis) seria uma variável (ou *input*) fundamental para o cálculo da função objetivo (a sua distância para a estação). Assim, diferentes posicionamentos para esta escola significam diferentes distâncias e a posição que fornecer a menor distância para a estação, seria a solução ótima para este problema de contexto simplificado.

Existem diversos métodos de otimização. Dentre eles, Tedeschi (2014) destaca os métodos heurísticos, dentre os quais encontram-se os algoritmos evolutivos. Os algoritmos evolutivos utilizam princípios da teoria da evolução natural para solucionar um determinado problema x.

Nesta lógica, cada possível solução é considerada como um indivíduo, membro de uma população: o conjunto de soluções para este problema  $x$ . Assim, a grosso modo, é possível afirmar que algoritmos evolutivos realizam uma espécie de seleção natural das soluções possíveis, por meio de combinações de suas características (e. g. mutações, *crossovers*, alterações randômicas) em um processo evolutivo onde somente as melhores soluções (de acordo com a função-objetivo previamente estabelecida) “sobrevivem”.

Problemas de otimização podem ainda ser classificados de acordo com a quantidade de objetivos que podem atender simultaneamente. Existem problemas que consideram uma única função objetivo e existem problemas de otimização multicritério, ou de multi-objetivo.

A otimização multi-objetivo gerencia um conjunto de funções-objetivo a serem otimizadas. É um recurso de suporte multicritério para tomada de decisões, que considera a otimização de problemas que envolvem mais do que um objetivo a ser simultaneamente satisfeito. Além disso, possui restrições que devem ser atendidas para que uma solução seja factível para um problema. Normalmente, em problemas de otimização multicritério, não há uma única solução que otimize simultaneamente cada objetivo. Nesse caso, as funções são conflitantes, e há uma série de soluções ótimas ou soluções de Pareto. Uma solução é chamada Pareto-ótima, ou não-dominante, se nenhuma das funções objetivo pode ser melhorada em termos de valor, sem diminuir algum dos outros valores das outras funções objetivo. Enquanto não houver nenhuma informação subjetiva adicional, todas as soluções de Pareto devem ser consideradas igualmente satisfatórias (ver Figura 22).

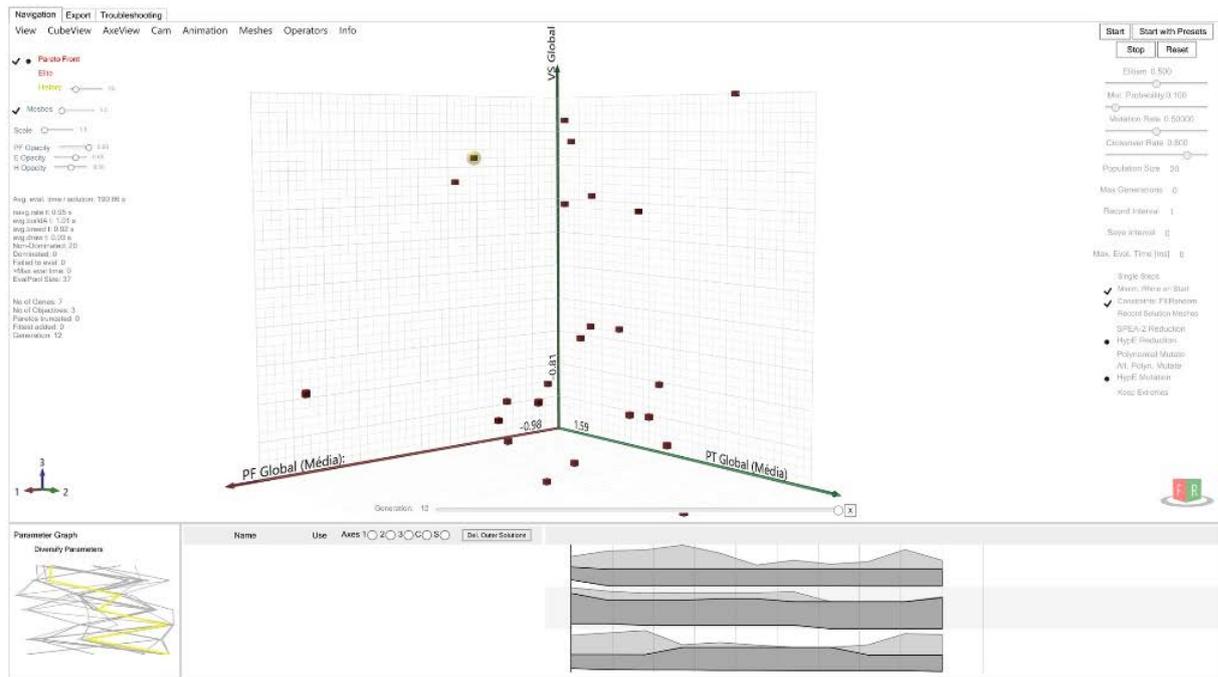


Figura 22. Interface do *plugin* Octopus para otimização multi-objetivo. Cada ponto neste gráfico tridimensional representa uma solução que visa a realizar *trade-offs* entre cada uma das funções objetivo a serem atendidas. Fonte: O autor.

Sendo assim, a otimização multi-objetivo pode ser aplicada em diversas situações, onde decisões precisam ser tomadas em situações de conflito entre dois ou mais objetivos. No contexto das estratégias adotadas para a elaboração de CityMetrics, a otimização multi-objetivo é essencial para a obtenção de soluções que envolvam objetivos conflitantes, que podem ser associados a diversas situações no escopo do projeto urbano e, mais especificamente, em contextos relacionados a tomada de decisão no âmbito do DOT.

### 3.2.4. Articulação das estratégias adotadas

As três estratégias básicas apresentadas anteriormente podem ser articuladas de maneira a estabelecer uma abordagem que vise à implementação de um sistema para a análise e a otimização de desempenho de configurações geométricas e algébricas de um determinado espaço urbano, sob a perspectiva de atributos objetivamente mensuráveis. A estrutura metodológica que CityMetrics preconiza, propõe, neste sentido, a construção de Sistemas Generativos sob a lógica da Linguagem de Programação Visual, de maneira a proporcionar um ambiente dinâmico para a programação, a alteração, a combinação e o compartilhamento de códigos em contexto *open-source*, visando a gerenciar grande quantidade de dados para realizar operações lógicas, por meio de diferentes métricas implementadas enquanto parâmetros para a geração/modificação de uma determinada configuração urbana. Assim, ferramentas algorítmicas com o propósito de aferir diferentes métricas relacionadas a princípios mensuráveis do DOT, podem ser associadas a diferentes funções objetivo (maximizando ou minimizando-as), de maneira a constituir uma abordagem que empregue a otimização de desempenho em função de princípios mensuráveis e de variáveis relativas à organização de uma determinada área urbana. Pretende-se assim, que CityMetrics possa ser utilizado em diversas questões, em contextos variados e de maneira a procurar por respostas/soluções tão diversificadas quanto

forem as perguntas/problemas a que se tentar abordar por meio dele. A Figura 23 visa a esquematar a articulação das estratégias no contexto metodológico de CityMetrics.

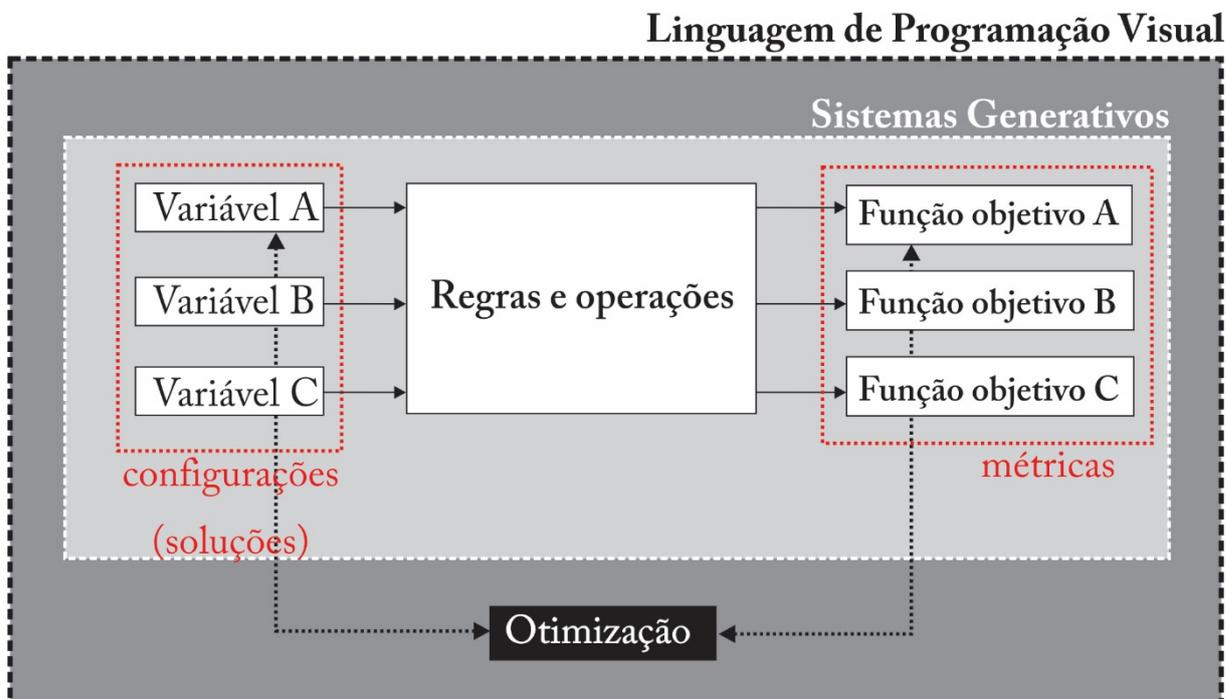


Figura 23. Articulação das estratégias fundamentais para a formulação e utilização do sistema proposto. CityMetrics se estabelece por meio da elaboração de Sistemas Generativos construídos em Linguagem de Programação Visual, para mensurar, utilizando métricas de desempenho, características relacionadas aos princípios mensuráveis do DOT, associando-os a diferentes funções-objetivo em problemas de otimização, de maneira a fornecer soluções ótimas para configurações geométricas urbanas. Fonte: O autor.

Em síntese, a estrutura metodológica de CityMetrics se desenvolve pela formulação de Sistemas Generativos em ambiente de Linguagem de Programação Visual que utilizam: a) um conjunto de ferramentas especificamente desenvolvidas para avaliação de desempenho por meio de métricas relacionadas a princípios mensuráveis do DOT, e; b) métodos de otimização para a obtenção de soluções mais adequadas para questões neste escopo. Além disso, os princípios abordados em CityMetrics visam a estabelecer os fundamentos para tarefas de avaliação e implementação do DOT orientadas pela tríade princípio-índice-ferramenta. Isto é, para cada princípio mensurável do DOT considerado, há uma ou mais ferramentas algorítmicas

associadas que permitem extrair índices por meio de métricas que visam a quantificar e, conseqüentemente, avaliar alternativas para configurações urbanas mais eficientes em uma área estudada.

### 3.3. O Conceito de CityMetrics

Conforme afirmado anteriormente, o contexto propositivo desta investigação excede a criação de instrumentos computacionais e abrange o desenvolvimento de um sistema para análise e otimização de desempenho de áreas urbanas, por meio da implementação algorítmico-paramétrica de uma série de métricas baseadas em referências de cálculo<sup>43</sup> e relacionadas a teorias existentes. O objetivo deste sistema é o de avaliar (e otimizar) configurações geométricas e algébricas de um determinado espaço urbano, sob a perspectiva de atributos objetivamente mensuráveis, contribuindo assim para a tomada de decisão em tarefas de projeto urbano e naturezas afins. Para isso, o DOT, um modelo de desenvolvimento urbano suportado por princípios que se baseiam em aspectos que podem ser objetivamente aferidos, foi adotado como referência de princípio para desenvolvimento deste sistema.

CityMetrics se estabelece por meio da articulação de uma série de estratégias (Linguagem de Programação Visual, Sistemas Generativos e Otimização) e da utilização combinada de um conjunto de ferramentas<sup>44</sup>, que utilizam referências de cálculo relativas a princípios do DOT enquanto métricas de avaliação de desempenho. Estas métricas são implementadas de maneira a resultar em índices que podem ser introduzidos como parâmetros para análise (e como *fitness*

---

<sup>43</sup> Estas referências de cálculo, apresentadas no Capítulo 1, estão relacionadas a princípios do DOT, que foi tomado como ponto de partida para a elaboração do sistema em questão. A implementação algorítmico-paramétrica destas referências se materializa sob a forma de uma série de ferramentas que as utilizam para formular métricas que objetivam avaliar a performance de um determinado espaço urbano.

<sup>44</sup> As ferramentas que serão descritas neste capítulo foram especificamente desenvolvidas para esta tese, mas incorporam algumas funcionalidades existentes, desenvolvidas por outros autores, como Nourian et al (2015). Na descrição de cada uma das ferramentas desenvolvidas, estarão explicitadas as funcionalidades incorporadas.

*functions* em operações de otimização) em modelos computacionais para avaliação e recomendação em tarefas de projeto urbano.

Assim, o sistema proposto pretende fornecer subsídios para a identificação e a avaliação de potencialidades e fragilidades (sob a perspectiva do DOT) de uma área urbana estudada, utilizando princípios mensuráveis deste modelo de desenvolvimento urbano como critério para tarefas de otimização e resolução de problemas. Almeja-se assim, contribuir para a obtenção de possibilidades a serem avaliadas pelos atores envolvidos nos processos de projeto urbano, para situações de avaliação e tomada de decisão. Neste contexto, o papel dos atores envolvidos no processo permanece central, uma vez que são eles que devem estipular objetivos, alimentar o sistema e considerar aspectos subjetivos e não programáveis para eleger as soluções a serem adotadas, de acordo com critérios intangíveis ao computador.

Desta maneira, CityMetrics não preconiza a dependência de um automatismo computacional, mas sim a utilização de recursos algorítmico-paramétricos como instrumentos de recomendação. A este respeito, Leite (2012, p.175), ao refletir sobre o aparato tecnológico na proposição de cidades mais sustentáveis, afirma que “é importante lembrar que a inteligência para criar a cidade sustentável é primeiro humana e depois tecnológica e não vice-versa”.

Assim, não se pretende conceber um sistema que inclua todas as variáveis envolvidas nos diferentes aspectos do DOT (tampouco encerrar nesta tese todas as possibilidades de formulação de ferramentas que possam surgir deste contexto metodológico), mas desenvolver um conjunto de ferramentas algorítmico-paramétricas que gerenciem dados e realizem cálculos complexos, suportando processos de tomada de decisão em contexto urbanístico. As ferramentas em si não fornecem bairros ou cidade melhores, mas objetivam permitir o cruzamento de

informações relevantes, proporcionando soluções apoiadas por dados obtidos de uma maneira mais dinâmica e eficiente do que os meios tradicionais permitem.

### 3.4. Ferramentas e métricas para análise e otimização de configurações urbanas

CityMetrics propõe a implementação de um conjunto de ferramentas, que se enquadram no contexto e no conceito do sistema apresentado anteriormente, e que podem ser combinadas de diversas maneiras para mensurar e otimizar o desempenho de configurações geométricas e formais de áreas urbanas, de acordo com princípios do DOT. Algumas destas ferramentas incorporam e aproveitam funcionalidades já existentes e apresentadas no capítulo anterior<sup>45</sup>, como alguns componentes dos *plugins ShortestWalk, Cheetah e Syntatic*. Estas ferramentas estão disponíveis para download no site: [http://www.ufjf.br/fernando\\_tadeu/citymetrics/](http://www.ufjf.br/fernando_tadeu/citymetrics/).

#### 3.4.1. Algoritmo de Proximidade Física (APF)

Esta ferramenta pode ser utilizada tanto no contexto do princípio da acessibilidade ao transporte, como no contexto do princípio da caminhabilidade, uma vez que permite calcular os percursos com as menores distâncias físicas entre diversas origens e alvos de uma localidade, considerando ainda as inclinações nos trajetos<sup>46</sup>. Para isso, o APF considera o posicionamento

---

<sup>45</sup> Alguns componentes dos *plugins* identificados no capítulo anterior foram utilizados na construção das ferramentas que serão descritas na sequência. Assim, determinadas funcionalidades já desenvolvidas foram aproveitadas, customizadas e combinadas com códigos elaborados nesta investigação, de maneira a auxiliar na definição das métricas de desempenho e objetivar um funcionamento mais especificamente orientado aos objetivos de cada ferramenta proposta. Aproveitamos assim, uma das muitas vantagens de se trabalhar na lógica algorítmico-paramétrica.

<sup>46</sup> Se o alvo informado ao algoritmo for uma estação de transporte, então esta ferramenta pode mensurar a acessibilidade ao transporte. Se, no entanto, forem informados como alvo um ou mais serviços urbanos de uma determinada região, o algoritmo pode ser utilizado para ajudar a mensurar a caminhabilidade de uma área.

das origens (todos os lotes de um bairro, por exemplo), o desenho das ruas e o posicionamento de um ou mais alvos de interesse para mensurar a proximidade física, de acordo com as referências de cálculo apresentadas no Capítulo 1. Assim, se um determinado lote (origem) está a até 400m de distância (5 min de caminhada) de um alvo, lhe é atribuído um índice de valor 1. À medida que a distância entre uma determinada origem e o alvo mais próximo se aproxima de 1,6 km (20 minutos a pé), esta pontuação diminui. Um índice de valor 0 é atribuído a origens cujas distâncias para o alvo mais próximo sejam maiores ou iguais a 1,6 km (ver Tabela 4).

Tabela 4. Valores de referência para cálculo de proximidade física.

Índice	Significado
1	Proximidade Excelente – menos de 5 min a pé
0,5	Boa proximidade – 10 min a pé
0	Proximidade desconsiderada – mais de 20min a pé

Além disso, tendo em vista a influência que as inclinações do trajeto possuem no tempo e no esforço necessários para deslocamentos a pé, o APF também permite aplicar um fator de penalização para percursos inclinados. Foi experimentada nesta ferramenta uma penalização que se dá proporcionalmente às inclinações percorridas, de maneira linear<sup>47</sup>. Assim, quanto maior for a inclinação de um determinado trecho, maior será a penalização do percurso. Por exemplo, ao considerar um percurso plano de 400m, o algoritmo atribui o índice máximo (1) a este trajeto. Se, no entanto, um outro percurso também for de 400m, mas com uma inclinação de 10%,

---

<sup>47</sup> Foi adotada uma referência para penalização por inclinação que propõe uma relação direta entre a inclinação de um percurso e a composição final do índice de Proximidade Física. Apesar de reconhecermos que esta relação direta não é a mais apropriada para o cálculo desta penalização, ela foi adotada nesta investigação, tendo em vista a dificuldade de encontramos estudos que direcionassem a relações satisfatórias. Contudo, considerando a lógica e o ambiente dinâmico no qual as ferramentas de CityMetrics foram desenvolvidas, é possível incorporar novos estudos – e códigos – que permitam adotar, posteriormente, outros critérios de penalização.

então o índice atribuído a este deslocamento sofre uma penalização de 10%, resultando em um índice de 0,9. Sugere-se assim uma relação direta entre inclinação dos percursos e penalização.

Conforme mencionado anteriormente, o APF pode ser utilizado para mensurar a acessibilidade ao transporte ou a caminhabilidade de uma determinada localidade. Entretanto, enquanto na acessibilidade ao transporte calculam-se os percursos com as menores distâncias físicas para uma única estação, no contexto da caminhabilidade interessa utilizar a mesma lógica para computar as menores distâncias físicas para os serviços urbanos mais próximos, considerando diversas categorias (educacional, comercial, alimentação, recreação, entretenimento, saúde e outros). Ou seja, enquanto a acessibilidade ao transporte se relaciona a um único alvo específico – a estação, a caminhabilidade possui múltiplos alvos de interesse – todos os estabelecimentos de todas as categorias de uma determinada área.

Por isso, o APF adapta também alguns aspectos do índice Walkscore (Walkscore, 2014), apresentado no Capítulo 1, por mensurar características relativas a caminhabilidade de um local, por meio de diversas categorias de serviços urbanos. Desta forma, o APF visa a mensurar a caminhabilidade de uma determinada área, por meio do cálculo dos percursos de menores distâncias para todos os alvos de uma mesma categoria de serviços, considerando, porém, apenas o mais próximo. Distâncias físicas, inclinações e respectivas penalizações também são consideradas para atribuir o índice de Proximidade Física às origens. Cada categoria recebe um índice parcial e o índice total é obtido por meio da média entre elas. A Figura 24 ilustra a lógica de cálculo deste algoritmo.

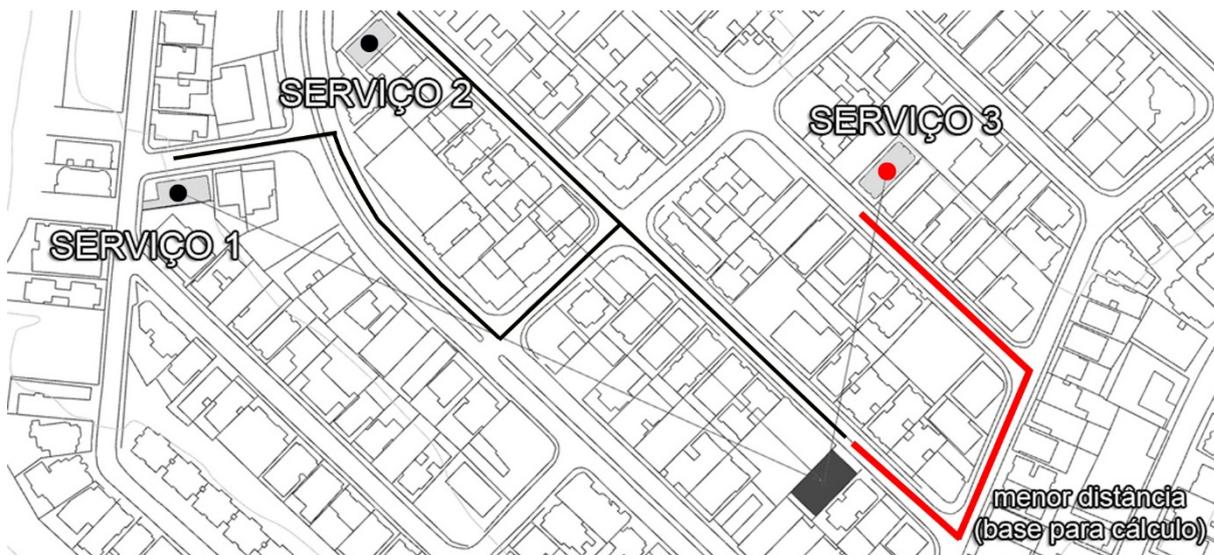


Figura 24. Lógica do cálculo do APF para múltiplos alvos: o algoritmo calcula os menores percursos físicos para todos os alvos (serviços) em uma categoria. Em seguida, identifica o serviço com menor distância física (em vermelho) e mensura a sua proximidade para a origem com base nesta distância (incluindo possíveis inclinações e suas respectivas penalizações). Fonte: O autor.

Além disso, o APF permite ainda inserir diferentes pesos para as origens, que podem ser estabelecidos em relação ao número de pessoas que ocupam cada localidade, por exemplo. Isso significa dizer que o cálculo da média dos índices de Proximidade Física pode ser, também, ponderado pela quantidade de unidades habitacionais (densidade) de um terreno, de modo a atribuir maior relevância a locais que concentrem mais pessoas. A Figura 25 apresenta o *cluster*<sup>48</sup> que contém o código contido na ferramenta, com suas entradas (*inputs*) e saídas (*outputs*) de dados.

---

<sup>48</sup> No contexto do Grasshopper, *cluster* é um recurso utilizado para agrupar todos os parâmetros e componentes de um determinado código construído dentro do próprio Grasshopper, de maneira a poder organizá-lo, simplificá-lo visualmente e reutilizá-lo várias vezes em um mesmo arquivo ou em vários. As ferramentas de CityMetrics foram todas programadas diretamente no Grasshopper, e por isso, se encontram organizadas sob a forma de *clusters*.



Figura 25. Interface do *Cluster* do APF. À esquerda, as informações necessárias (entradas) para os cálculos da ferramenta (pontos referenciando as posições das origens e dos alvos, curvas referenciando o desenho das ruas e dados para referenciar diferentes densidades - pesos para o cálculo). À direita, o resultado de suas operações. Fonte: O autor.

### 3.4.2. Algoritmo de Variedade de Serviços (AVS)

O algoritmo para cálculo da Variedade dos Serviços (AVS) visa a mensurar um outro aspecto importante para a avaliação da caminhabilidade de um determinado local: a proximidade entre uma origem e todos os alvos (serviços urbanos) ao seu alcance. Neste sentido, esta ferramenta calcula a média das distâncias entre uma determinada origem e todos os alvos próximos em uma determinada categoria de serviços urbanos. Este algoritmo funciona de maneira complementar ao APF, pois, enquanto o primeiro considera apenas a distância para o serviço mais próximo, o AVS atribui um índice considerando a distância média entre todos os alvos e a origem em questão. Assim, enquanto o APF mensura a distância do serviço mais próximo a uma origem, o AVS considera as distâncias entre esta mesma origem e todos os alvos informados em uma mesma categoria, conforme demonstra a Figura 26. Este índice é importante pois permite diferenciar origens que possuam muitos alvos próximos (ou seja, maior variedade de serviços) daquelas que apresentem boa proximidade a um único alvo – para promover uma melhor

caminhabilidade, importa também a variedade de serviços disponíveis, e não apenas a proximidade a um único alvo. Esta ferramenta também permite estabelecer pesos diferentes para cálculo de média ponderada. A Figura 27 apresenta a interface do *cluster* referente a este algoritmo.

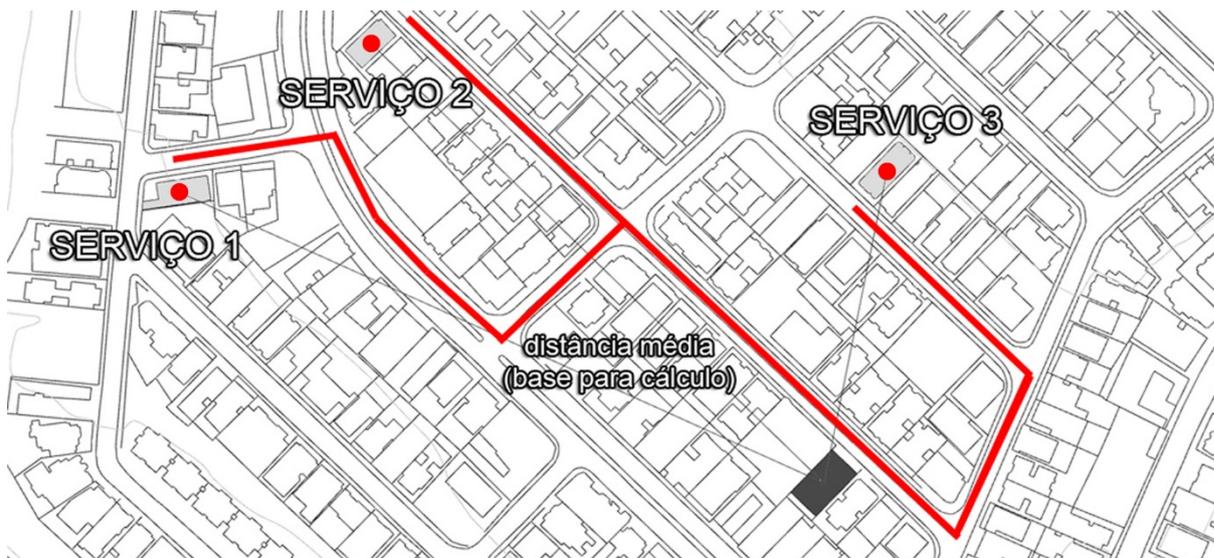


Figura 26. Base de cálculo do AVS: o algoritmo considera a distância para todos os alvos e calcula a média das distâncias para estabelecer sua pontuação. Fonte: O autor.

Alvo(s)	Variedade Serviços - VS	Variedade Serviços - VS
Desenho das ruas		VS (média)
Origem(ns)		VS (média ponderada)
		VS (menor)
Pesos (média ponderada)		VS (maior)

Figura 27. Interface do *Cluster* do AVS. À esquerda, as informações necessárias (entradas) para os cálculos da ferramenta. À direita, o resultado de suas operações. Fonte: O autor.

### 3.4.3. Algoritmo de Recorrência de Serviços (ARS)

O algoritmo para cálculo da Recorrência dos Serviços (ARS) também visa a mensurar a caminhabilidade de uma determinada área e trabalha de maneira complementar às ferramentas APF e AVS. Enquanto as primeiras calculam a menor distância física para o alvo mais próximo e a distância média para todos os alvos, respectivamente, o ARS possui características quantitativas, pois calcula a proporção entre o número de alvos informados (em uma determinada categoria de serviços) e o número total de localidades de uma área analisada, conforme ilustra a Figura 28.



Figura 28. O ARS identifica todos os serviços em uma determinada categoria (em vermelho), todas as localidades em um determinado raio de alcance de até 20 min de caminhada (em amarelo) e informa a proporção entre eles. Fonte: O autor.

Este algoritmo, cuja operação básica consiste em efetuar a contagem de alvos dentro de um raio de 20 minutos de caminhada e dividir este valor pelo número de lotes desta mesma área, é importante para análise da oferta de serviços em uma determinada vizinhança, um aspecto

igualmente importante para se mensurar a capacidade que uma determinada localidade possui de conectar habitações e diversos serviços urbanos por meio de distâncias que podem ser percorridas a pé<sup>49</sup>. Este algoritmo também possibilita atribuir pesos diferentes às origens para cálculo da média ponderada dos índices de Recorrência dos Serviços, o que permite dar maior relevância a localidades que possuam maior número de unidades habitacionais, conforme explicado anteriormente. A Figura 29 apresenta a interface do *cluster* referente a este algoritmo.



Figura 29. Interface do *Cluster* do ARS. À esquerda, as entradas para os cálculos da ferramenta (pontos referenciando as posições das origens e dos alvos, curvas emulando o desenho das ruas e dados para representar diferentes pesos para o cálculo). À direita, o resultado de suas operações. Fonte: O autor.

#### 3.4.4. Algoritmo de Proximidade Topológica (APT)

Assim como o APF, o algoritmo para cálculo do índice de Proximidade Topológica (APT) é uma outra ferramenta proposta que pode ser utilizada tanto no contexto do princípio da acessibilidade ao transporte, como no contexto do princípio da caminhabilidade. O APT aborda

<sup>49</sup> Diversos estudos consideram questões relacionadas à proporção entre o número de serviços disponíveis e quantidade de localidades de uma área como importantes para mensurar a caminhabilidade de um local. Frank et al (2005) e Dobesova & Krivka (2012) utilizam o *Walkability index*, que aborda esta referência de cálculo.

a métrica topológica<sup>50</sup>, utilizando conceitos da teoria da Sintaxe Espacial de Hillier & Hanson (1984) e pode ser empregado de maneira complementar às ferramentas de CityMetrics que utilizam a métrica física. Neste sentido, o APT visa a calcular os percursos com as menores distâncias topológicas entre diversas origens e alvos de uma localidade e a integração/profundidade dos espaços de uma determinada área. Ou seja, esta ferramenta calcula o número de mudanças de direção (passos topológicos locais e/ou globais) necessárias para se atingir um ou mais alvos a partir de uma determinada origem, e também indica quais espaços são mais integrados – o que significa identificar quais ruas são mais acessíveis e, conseqüentemente, possuem maior relevância na dinâmica de uma área urbana. A Figura 30 ilustra como se dá o cálculo das distâncias topológicas.

---

<sup>50</sup> A métrica topológica, no contexto desta investigação, é aquela que pretende aferir a distância entre diferentes localidades por meio de algumas medidas sintáticas da teoria da Sintaxe Espacial. Isto é, a partir das relações entre os espaços de uma determinada área urbana, tendo em vista uma interpretação relacional. Ou seja, a métrica topológica parte da premissa de que a configuração urbana afeta o padrão espacial de deslocamentos das pessoas pela cidade e visa a calcular a distância entre dois pontos por meio do número de conexões entre as vias necessárias para interligá-los, por exemplo. Esta métrica é especialmente importante para esta pesquisa, pois segundo, Hillier & Hanson (1984), espaços topologicamente mais integrados tendem a corresponder aos chamados centros ativos, que correspondem aos espaços urbanos em que há maior quantidade e diversidade de usos e fluxos.

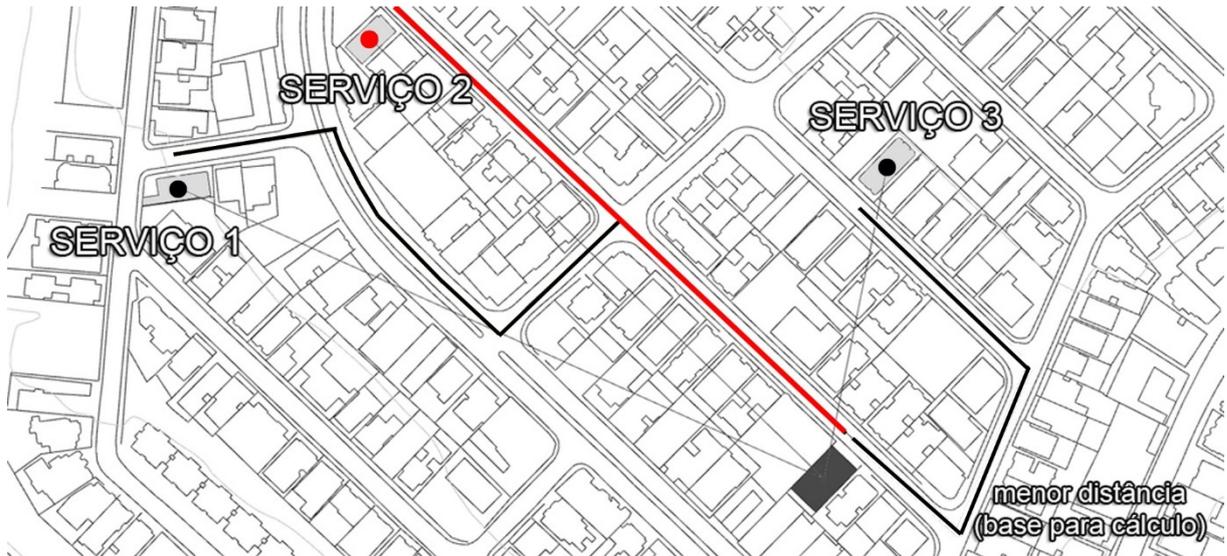


Figura 30. Ilustração do cálculo do APT: pela métrica topológica, o serviço 2 é o mais próximo da origem, pois se encontra no mesmo espaço topológico e não demanda mudança de direção, ou conexão. Ou seja, apesar de o serviço 2 se encontrar fisicamente mais distante da origem considerada do que o serviço 3, a distância topológica entre a origem e o serviço 2 é menor. Fonte: O autor.

O APT também permite incorporar pesos diferentes para cálculo de média ponderada da Proximidade Topológica. Assim, os processos internos do algoritmo podem conferir maior relevância a ruas, de acordo com diferentes critérios. A Figura 31 ilustra a interface do *cluster* do APT.



Figura 31. Interface do *Cluster* do APT. À esquerda, as entradas para os cálculos da ferramenta. À direita, o resultado de suas operações. Fonte: O autor.

### 3.4.5. Algoritmo de Uso Misto (AMXI)

O algoritmo para cálculo do índice de Uso Misto (AMXI) visa a medir objetivamente a diversidade de uma localidade. Para isso, o AMXI incorpora o conceito do índice de uso misto (*mixed-use index* - MXI) elaborado por Hoek (2008), que calcula a proporção entre a soma de todas as áreas residenciais e não residenciais de uma localidade, realizando uma comparação destas proporções. Segundo Hoek (2008), quanto mais próxima a relação entre as áreas é de 50/50, maior a diversidade que uma área urbana possui<sup>51</sup>. Este algoritmo possui grande importância no contexto de CityMetrics, por permitir mensurar a diversidade de uma determinada área antes e depois de potenciais intervenções. Em algumas abordagens, o índice MXI pode ser, inclusive, configurado como uma das funções objetivo de uma tarefa de otimização, na procura por áreas com maiores diversidades. A Figura 32 apresenta a base de cálculo do AMXI e a Figura 33 ilustra a interface do *cluster* do AMXI.

---

<sup>51</sup> Esta proporção colocada por Hoek não deve ser encarada como um limite rígido a ser perseguido. Existem outros fatores que devem ser levados em consideração para se estabelecer metas para a relação entre áreas residenciais e não residenciais, como a “vocação” de um determinado bairro, por exemplo. Entretanto, a lógica de cálculo empregada no MXI é de grande importância para a elaboração do sistema proposto.

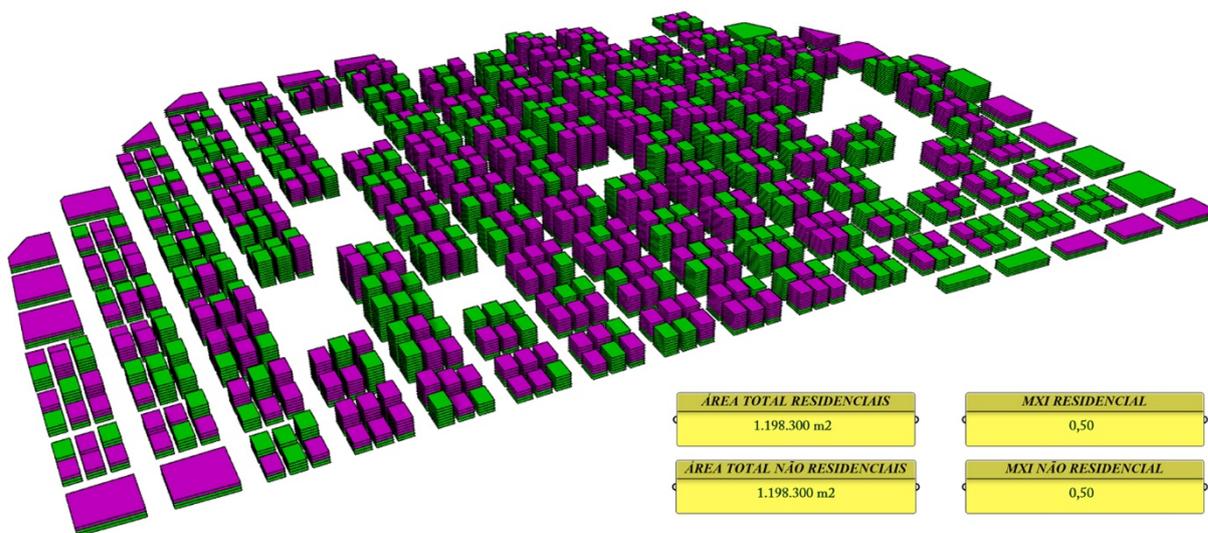


Figura 32. O AMXI realiza o cálculo da soma de todas as áreas residenciais (em magenta) e não residenciais (em verde) de uma localidade, calculando a proporção entre elas. Fonte: O autor.

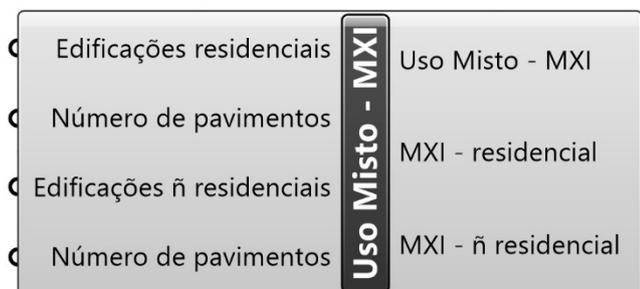


Figura 33. Interface do *Cluster* do AMXI. À esquerda, as entradas para os cálculos da ferramenta. À direita, o resultado de suas operações. Fonte: O autor.

### 3.4.6. Algoritmo de Indicadores Spacematrix

O algoritmo para cálculo dos indicadores Spacematrix visa a fornecer os cálculos para a medição da densidade de áreas estudadas, informando os três indicadores fundamentais propostos por

Pont & Haupt (2010) e apresentados no Capítulo 1: intensidade (*Floor Space Index* - FSI), cobertura (*Ground Space Index* - GSI) e densidade da rede (*Network Density* - N).

Desta forma, uma vez informados os contornos da área analisada e de suas edificações, o número de pavimentos de cada uma destas edificações e o desenho das ruas contidas em uma área de análise, o algoritmo informa o FSI, o GSI e o N da área urbana em questão. Esta ferramenta possui grande importância no contexto de CityMetrics, pois possibilita calcular e visualizar informações acerca da densidade de áreas urbanas em tempo real, permitindo a avaliação dinâmica dos contextos urbanos estudados e das intervenções/modificações propostas. A Figura 34 ilustra os elementos para cálculo do *Spacematrix*, e a Figura 35 apresenta o cluster desta ferramenta.

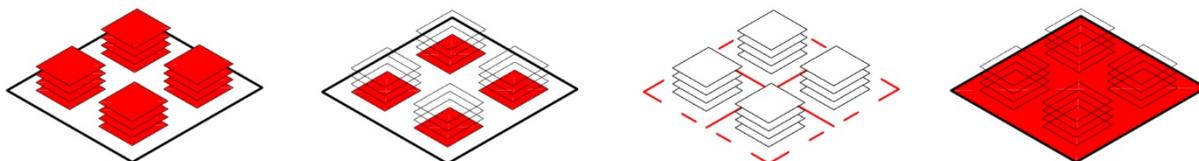


Figura 34. Elementos utilizados para cálculo dos indicadores *Spacematrix*: valor total de áreas construídas, de áreas ocupadas, comprimento de rede de ruas e área total, respectivamente. Fonte: Adaptado de Pont & Haupt (2010).

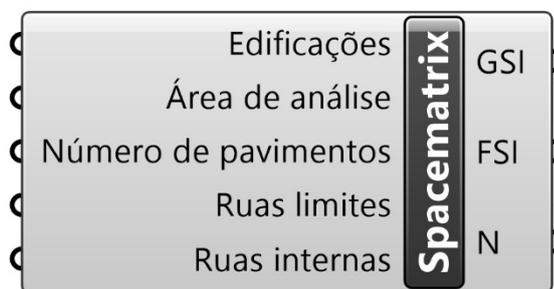


Figura 35. Interface do Cluster do algoritmo para cálculo dos indicadores *Spacematrix*. À esquerda, as entradas para os cálculos da ferramenta. À direita, o resultado de suas operações. Fonte: O autor.

### *3.5. Reflexões sobre o sistema e as ferramentas propostas*

CityMetrics pode ser sintetizado por meio da implementação de Sistemas Generativos em Linguagem de Programação Visual, de maneira a associar ferramentas algorítmicas especificamente desenvolvidas (ou adaptadas) para abordar métricas de avaliação de desempenho a regras e operações lógicas, fornecendo índices que podem ser utilizados como fitness functions (ou funções-objetivo) em tarefas de otimização. Assim sendo, torna-se possível uma associação dinâmica de recursos computacionais para avaliação de desempenho a métodos “tradicionais” de projeto urbano, promovendo uma maior integração entre operações lógico-matemáticas com questões eminentemente subjetivas – que devem ser consideradas pelos atores envolvidos no processo de tomada de decisão.

A utilização do conjunto de ferramentas de CityMetrics pode se dar em diferentes contextos e situações, com diversas funções-objetivo a serem otimizadas e com arranjos das ferramentas tão diversos quantos forem os problemas que se tentar solucionar. Logo, a utilização de CityMetrics pode (e deve) extrapolar o escopo do DOT, sendo direcionada a outras questões relacionadas à distância física ou topológica, à diversidade e à densidade nos centros urbanos, podendo ser aplicada por extensão a demais teorias e contextos de natureza semelhante, desde que estes se baseiem em princípios objetivamente mensuráveis.

As ferramentas elaboradas estão disponibilizadas para utilização por meio de download no site:

[http://www.ufjf.br/fernando\\_tadeu/citymetrics/](http://www.ufjf.br/fernando_tadeu/citymetrics/).



“I think learning to code can be helpful with thinking logically and in understanding complexity. Coding doesn’t solve social problems in itself, but I think it can contribute to a better understanding of the world that we live in”

**Casey Reas**

Este capítulo apresenta uma descrição detalhada da implementação de CityMetrics em um conjunto de ensaios preliminares que abordam diferentes situações e utilizam assimetrias<sup>52</sup> para uma avaliação da potencialidade de utilização do sistema desenvolvido. Assim, os ensaios preliminares que serão apresentados neste capítulo pretendem permitir verificar o funcionamento de CityMetrics em contextos variados, por meio de um crescente grau de quantidade e complexidade de variáveis e restrições entre os casos, utilizando as seguintes assimetrias para avaliação do sistema e das ferramentas propostas: a) utilização de otimizações com uma única função objetivo x otimizações de multi-objetivo; b) implementação em área abstrata<sup>53</sup> x implementação em área existente e consolidada, e; c) utilização de métricas físicas x utilização de métricas físicas e topológicas, simultaneamente. Desta forma, os ensaios preliminares que serão descritos neste capítulo variam quanto aos recursos de otimização empregados, quanto à natureza da área avaliada, quanto às ferramentas (e métricas) utilizadas e quanto à quantidade e à complexidade das variáveis abordadas, de maneira a procurar avaliar CityMetrics em diversas situações e contextos, conforme ilustra a Figura 36.

---

<sup>52</sup> O termo “assimetria” é aqui empregado para designar determinadas diferenças estrategicamente adotadas entre os ensaios preliminares elaborados. Estas diferenças, ou assimetrias, atuam como uma espécie de categoria analítica, uma vez que possibilitam avaliar os dados e resultados obtidos em diferentes ensaios preliminares, por meio de comparações entre eles.

<sup>53</sup> Para efeito desta pesquisa, utiliza-se o termo “área abstrata” para designar uma área não existente ou um local ainda não ocupado. Ou seja, uma localidade com pequena quantidade de condicionantes e que permita uma avaliação das ferramentas com menor número de restrições do que uma área já ocupada. Neste sentido, as áreas abstratas atuam como um facilitador para a elaboração de uma prova de conceito.

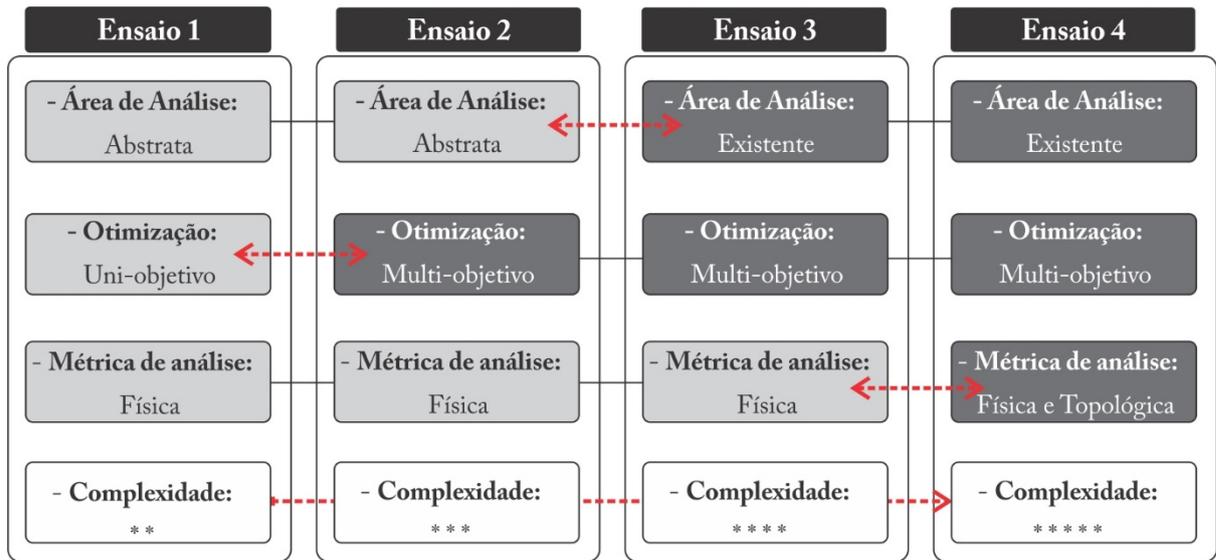


Figura 36. Estrutura dos ensaios preliminares que serão apresentados neste capítulo. As setas em vermelho indicam momentos de transição metodológica entre cada abordagem, permitindo compará-las para a avaliação de CityMetrics em diferentes contextos, por meio das assimetrias adotadas. A cada ensaio, a quantidade e a complexidade das variáveis consideradas aumenta. Fonte: O autor.

#### 4.1. Ensaio preliminar 1 – Prova de Conceito

Este primeiro ensaio preliminar foi concebido para servir como uma prova de conceito<sup>54</sup> para CityMetrics. Assim, este ensaio é um ponto de partida para os demais, que serão descritos em sequência e apresentam crescente complexidade. Neste primeiro experimento, princípios mensuráveis do DOT foram abordados em uma tarefa conceitual, seguindo uma sequência de passos, conforme apresentado de maneira geral na Figura 37, e mais detalhadamente na Figura 38, na Figura 39 e na Figura 40.

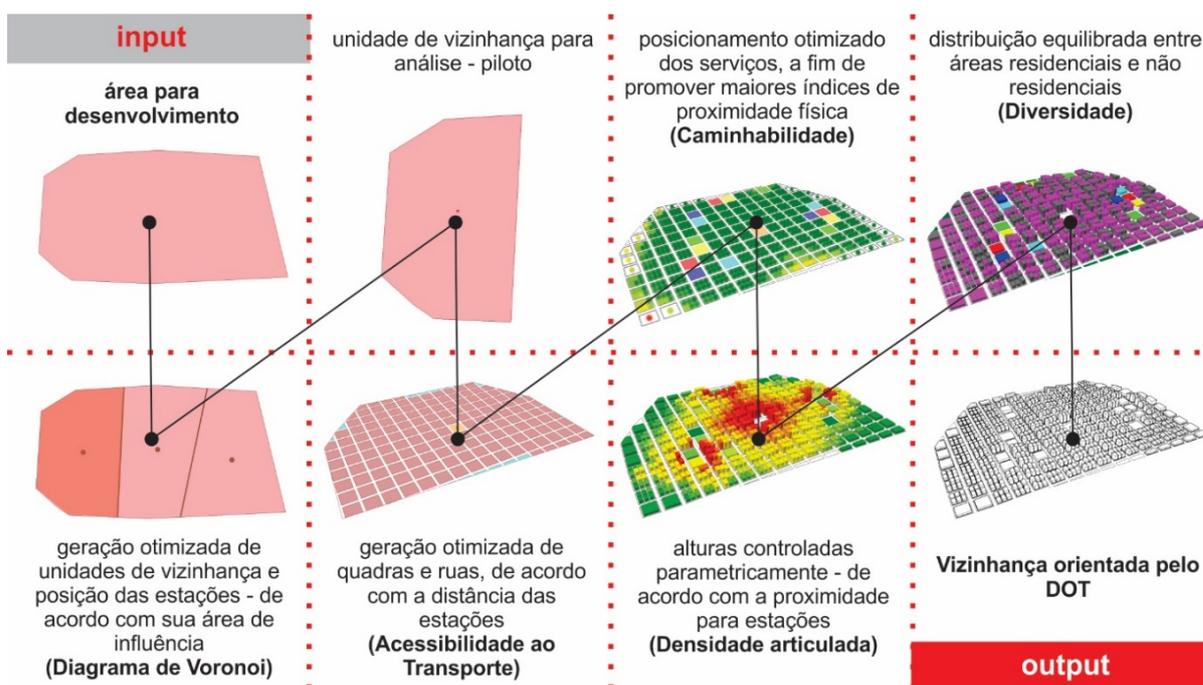


Figura 37. Sequência de etapas do experimento referente ao ensaio preliminar 1. Fonte: O autor.

<sup>54</sup> Prova de conceito, conforme afirmado, é um termo utilizado para designar um modelo prático que visa a comprovar um conceito em uma investigação. Pode se referir também a uma implementação, resumida ou incompleta, de um sistema ou de uma ideia, realizada para verificar se o conceito ou teoria em questão é suscetível de ser explorado de maneira útil. Assim, este ensaio preliminar apresenta uma avaliação da implementação, ainda que resumida, do sistema proposto em tarefas de projeto. Mais do que avaliar as decisões ou direcionamentos propostos nos ensaios, entende-se que a importância destes reside em possibilitar avaliar o potencial de geração de diferentes alternativas e a tomada de decisão suportada por métricas de avaliação de desempenho.

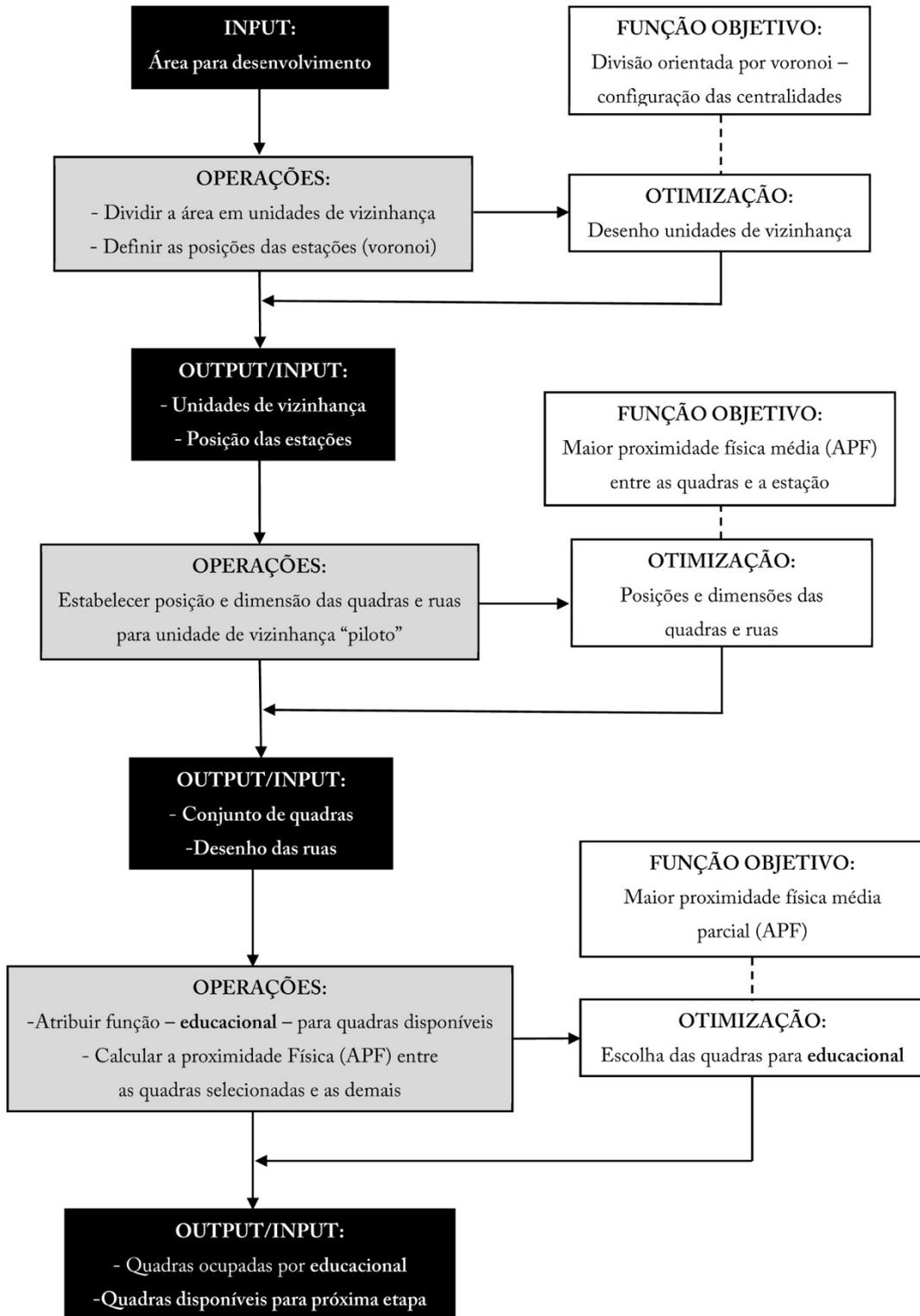


Figura 38. Descrição detalhada do experimento referente ao ensaio preliminar 1. Parte 1. Fonte: O autor.

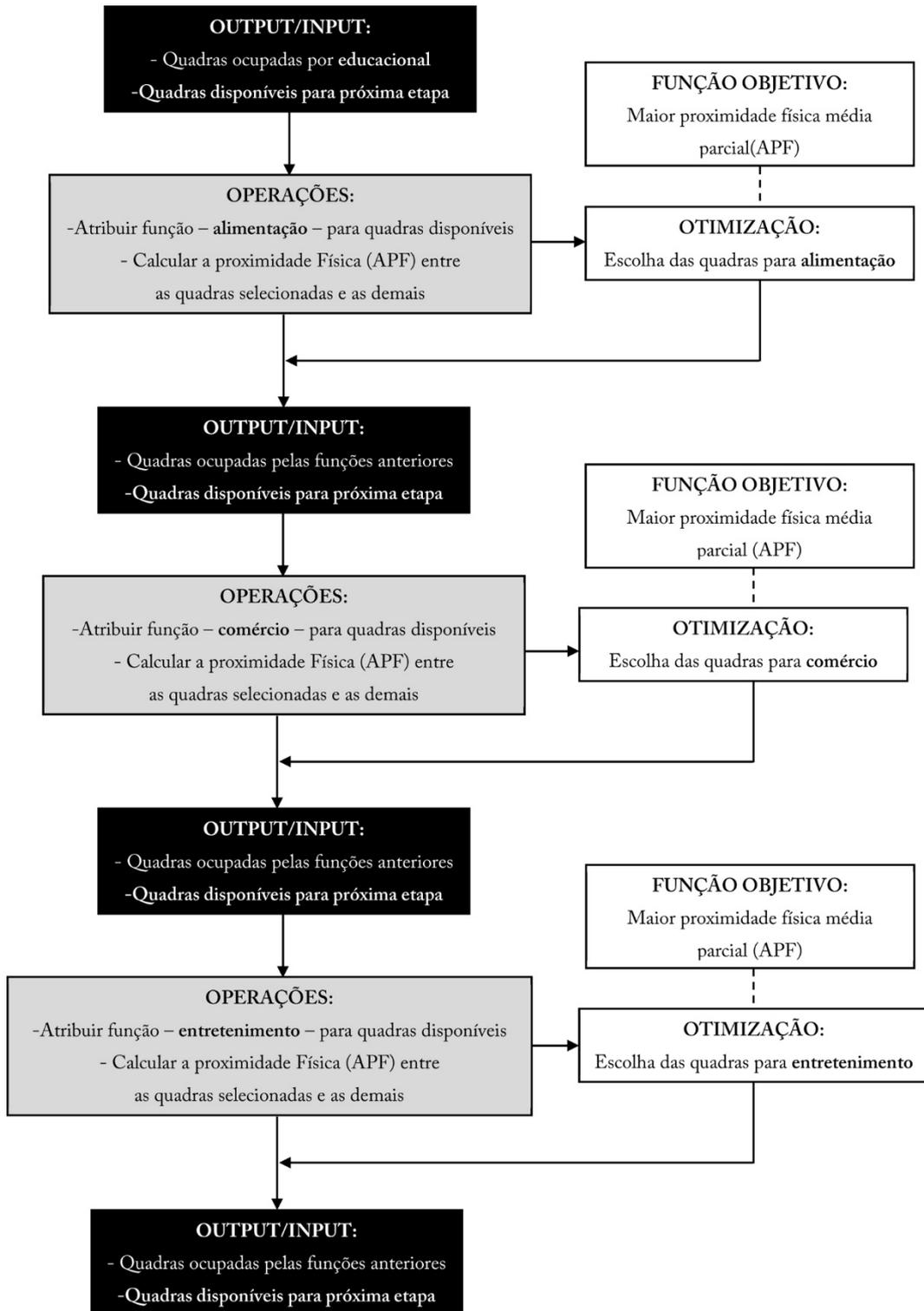


Figura 39. Descrição detalhada do experimento referente ao ensaio preliminar 1. Parte 2. Fonte: O autor.

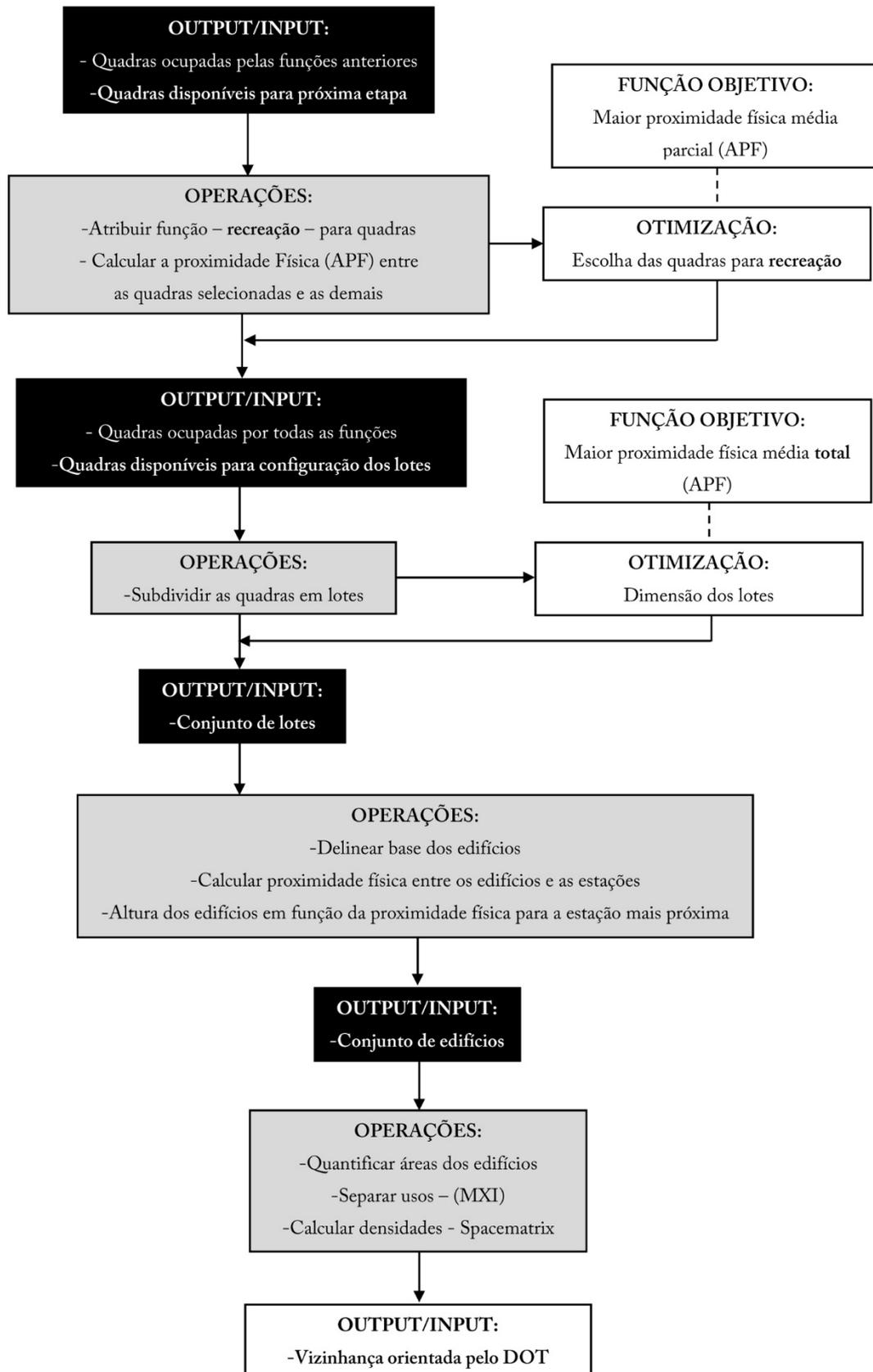


Figura 40. Descrição detalhada do experimento referente ao ensaio preliminar 1. Parte 3. Fonte: O autor.

Uma vez estabelecida uma área para o desenvolvimento do experimento, o primeiro passo foi elaborar uma definição algorítmica que permitisse subdividir esta área em unidades de vizinhança com uma escala mais apropriada para o DOT (em torno de 800m de raio), definindo suas centralidades por meio da lógica do diagrama de voronoi (ver Figura 41).

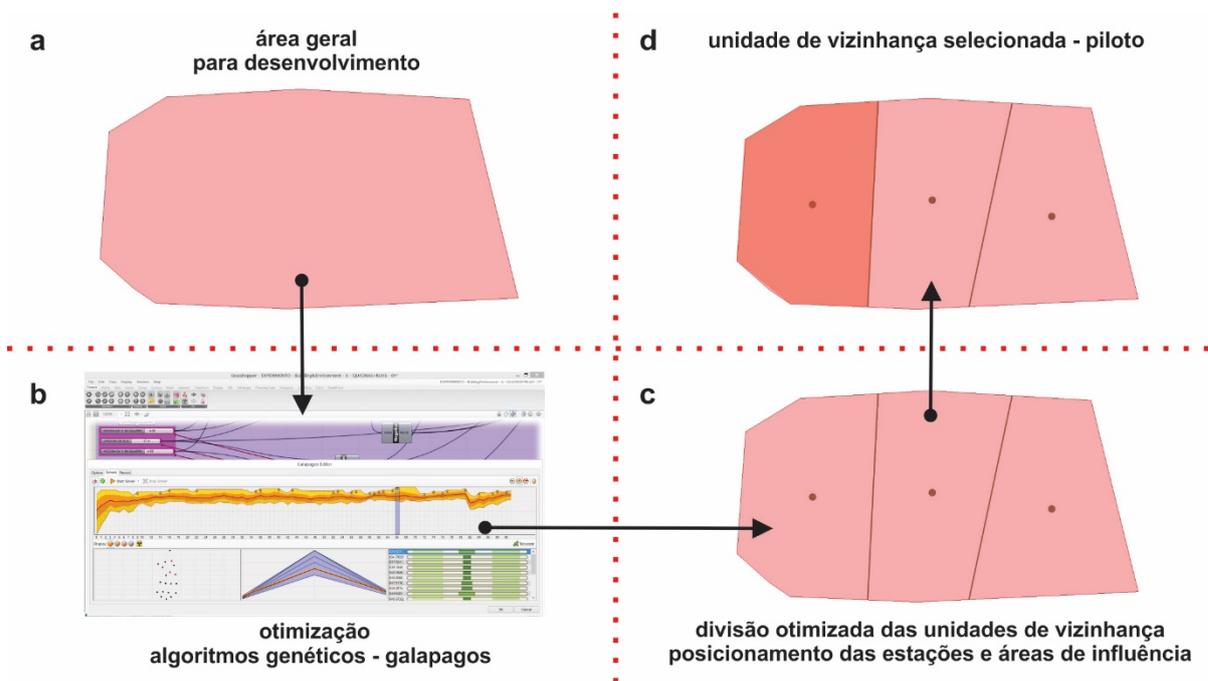


Figura 41. Processo para divisão da área inicial em unidades de vizinhança, com as posições das estações determinadas por suas áreas de influência. Fonte: O autor.

A partir daí, foi elaborado um código para posicionar a estação de transporte e organizar a rede de ruas e as quadras, cujas dimensões foram definidas por meio de uma divisão ortogonal regular. O passo seguinte foi executar uma tarefa de otimização, que objetivou encontrar as configurações mais eficientes para a geometria das quadras e ruas, refinando suas dimensões e seus posicionamentos. O Algoritmo de Proximidade Física (APF) alimentou a tarefa de otimização, de maneira a procurar pelo arranjo que proporcionasse a maior Proximidade Física (PF) média entre todos os terrenos e a estação. Assim, o objetivo inicial era o de obter uma

configuração com elevada acessibilidade ao transporte. Em outras palavras, buscou-se encontrar quais dimensões de blocos e ruas proporcionaria a menor distância média entre todos os lotes e a estação, conforme ilustra a Figura 42.

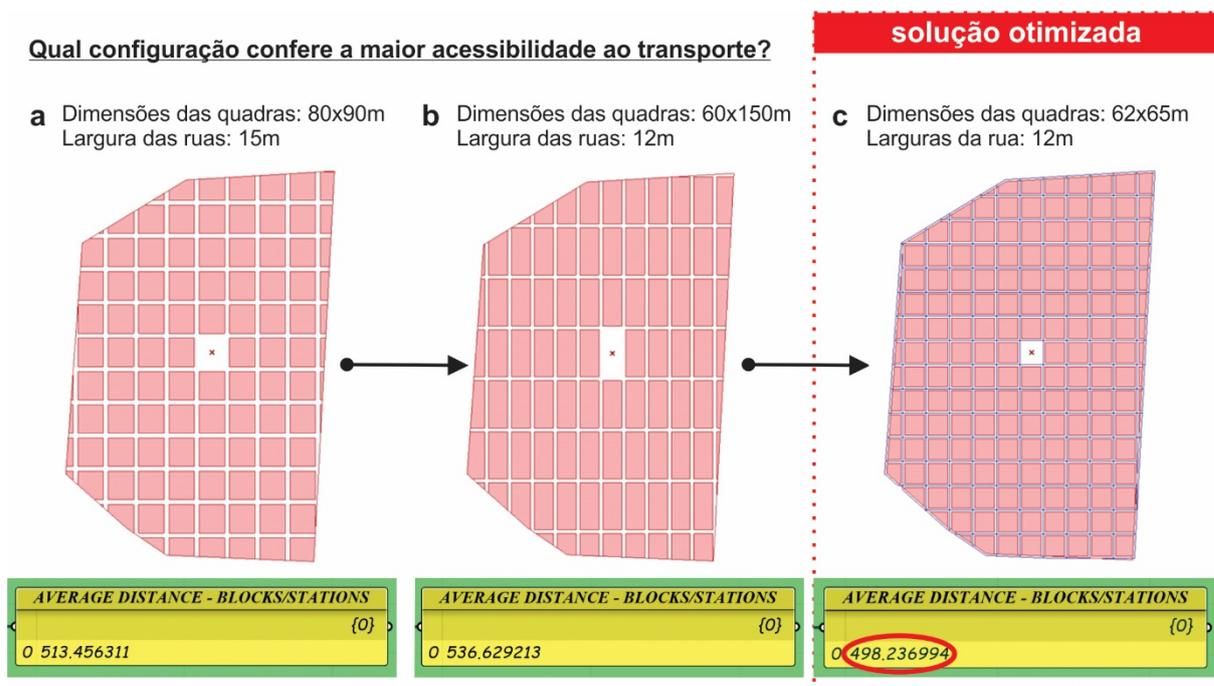


Figura 42. Alguns dos possíveis arranjos avaliados e a configuração “ótima” encontrada. Ou seja, aquela que forneceu a menor distância média entre todos os lotes e a estação, ou a maior acessibilidade ao transporte. Fonte: O autor.

Após a definição do desenho ótimo para quadras e ruas, o passo seguinte foi encontrar quais seriam as melhores quadras para posicionar os serviços urbanos, considerando cinco categorias de serviços essenciais para o cálculo da caminhabilidade<sup>55</sup>. Para isso, o APF foi utilizado para

<sup>55</sup> Neste primeiro ensaio preliminar apresentado, bem como no segundo, as categorias de serviço abordadas são as seguintes: educacional, alimentação, comércio, entretenimento e recreação. Nos dois últimos casos, serão incorporadas a estas cinco categorias iniciais as categorias “saúde” (que engloba estabelecimentos como hospitais e clínicas) e “outros” (que engloba serviços diversos como academias e bancos entre outros).

estimar os índices de Proximidade Física (PF) globais e parciais<sup>56</sup> de todos os locais dentro do perímetro do bairro, utilizando algoritmos genéticos para otimização. Estes cálculos consideraram as menores distâncias físicas entre os locais, dada a rede de ruas proposta. Este procedimento foi repetido para cada uma das cinco categorias de serviços, até que uma configuração ótima para posicionamento dos serviços foi encontrada. Em sequência, elaborou-se a divisão das quadras em lotes, de maneira a manter a maior PF média global (ver Figura 43).

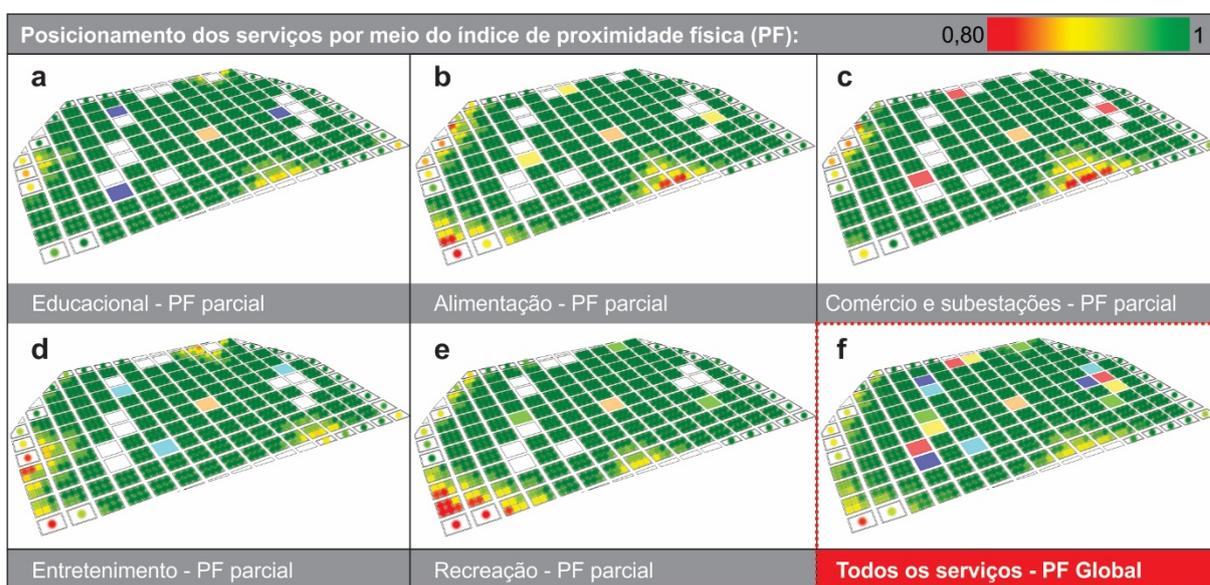


Figura 43. Processo de otimização do índice de Proximidade Física (PF) para posicionamento dos serviços. A cada etapa, eram selecionadas as quadras para implementação de cada categoria de serviço, representadas na imagem, por meio de cores diferentes. Fonte: O autor.

Conforme afirmado anteriormente, a densidade é de fundamental importância no contexto do DOT. O ambiente paramétrico e o algoritmo para cálculo dos indicadores *Spacematrix* permitiram uma avaliação articulada e dinâmica das geometrias urbanas, por meio da análise de

<sup>56</sup> Índices de PF parciais se referem ao cálculo da proximidade em relação a apenas uma categoria, isoladamente. Os índices de PF globais correspondem à média dos índices de todas as categorias.

diferentes cenários de ocupação, de acordo com as densidades mínimas residenciais necessárias para apoiar diferentes modais de transporte. Assim, foi possível relacionar a altura (e por consequência a densidade) das edificações, de acordo com a distância dos locais para a estação principal ou para uma das subestações, posicionada nas quadras indicadas para o comércio, conforme ilustra a Figura 44.

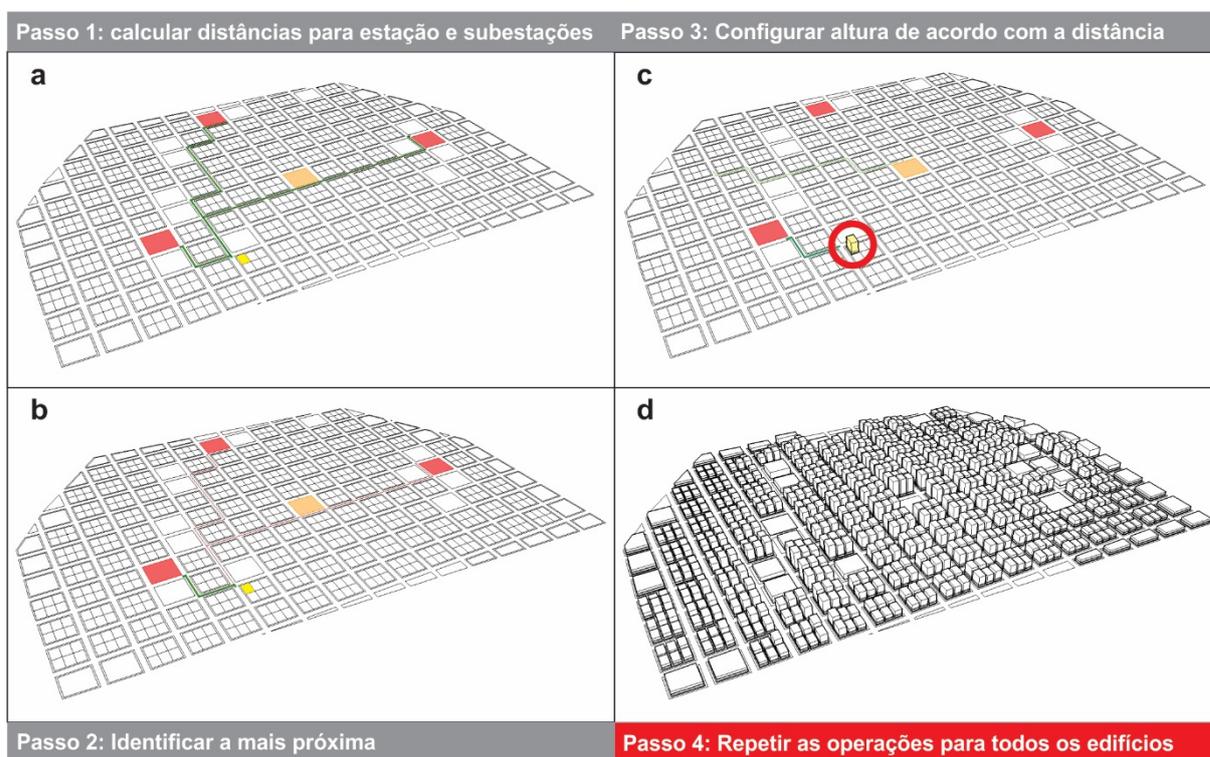


Figura 44. Cálculo das distâncias para a estação ou subestações, para determinação das alturas máximas dos edifícios. Fonte: O autor.

O metrô leve foi adotado como modal primário, mas outros modais secundários foram considerados, a fim de verificar a funcionalidade do modelo. A densidade crescente de acordo com a distância para a estação não se refere apenas às alturas das edificações, mas também ao cálculo mínimo e máximo de construção que permita satisfazer a condição fundamental que é a densidade média como um papel de apoio para os modais primários. Uma vez que um modal

primário é alterado, toda a geometria planejada para a vizinhança pode ser automaticamente rearranjada, como demonstra a Figura 45.

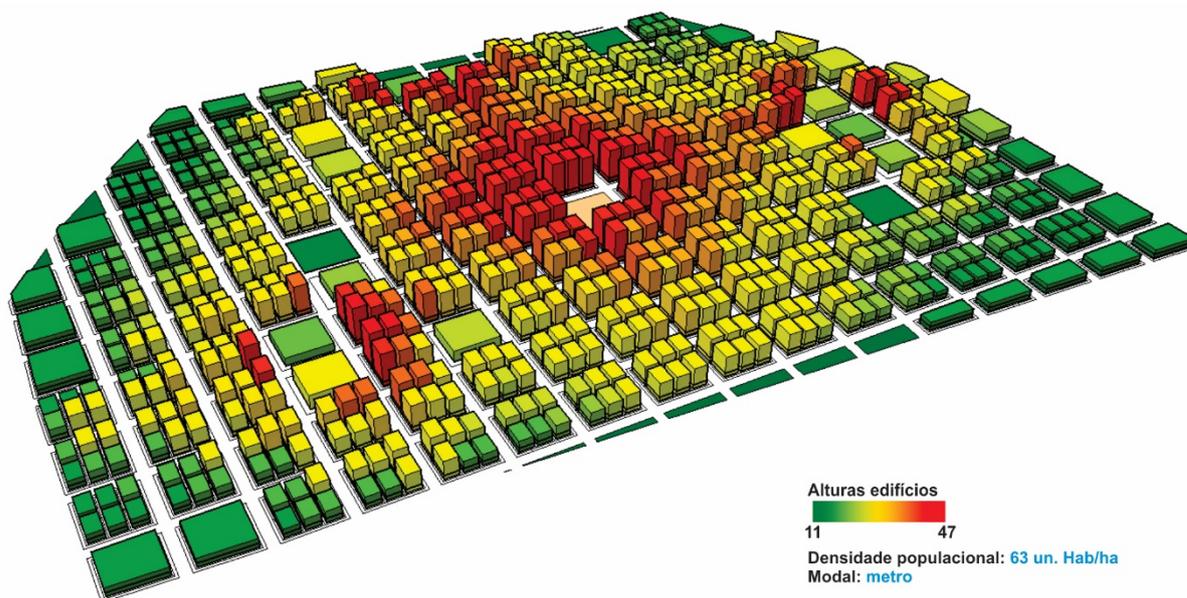


Figura 45. Controle paramétrico das alturas das edificações e da densidade da área analisada. O arranjo das geometrias das edificações foi elaborado de maneira a atender à densidade populacional necessária ao modal adotado, bem como a permitir maiores alturas (e, conseqüentemente, concentração de pessoas), de acordo com a PF para a estação ou subestações. Fonte: O autor.

O Algoritmo de Uso Misto (AMXI) proporcionou uma distribuição equilibrada entre áreas residenciais e não residenciais, em uma função de zoneamento capaz de assegurar uma proporção de 1/1, ou um Mixed-Use Index de 0,5. Esta relação especial, defendida em muitas discussões do DOT, é uma maneira de propor que os locais de trabalho estejam próximos às residências, e, por conseguinte, cada metro quadrado de residência no bairro corresponda a um metro quadrado de área de trabalho, conforme sugerido por diversos autores (Dittmar &

Ohland, 2004; Hoek, 2008; Farr, 2013). A Figura 46 e a Figura 47 apresentam as configurações de usos<sup>57</sup> e a Proximidade Física dos edifícios propostos para os serviços, respectivamente.

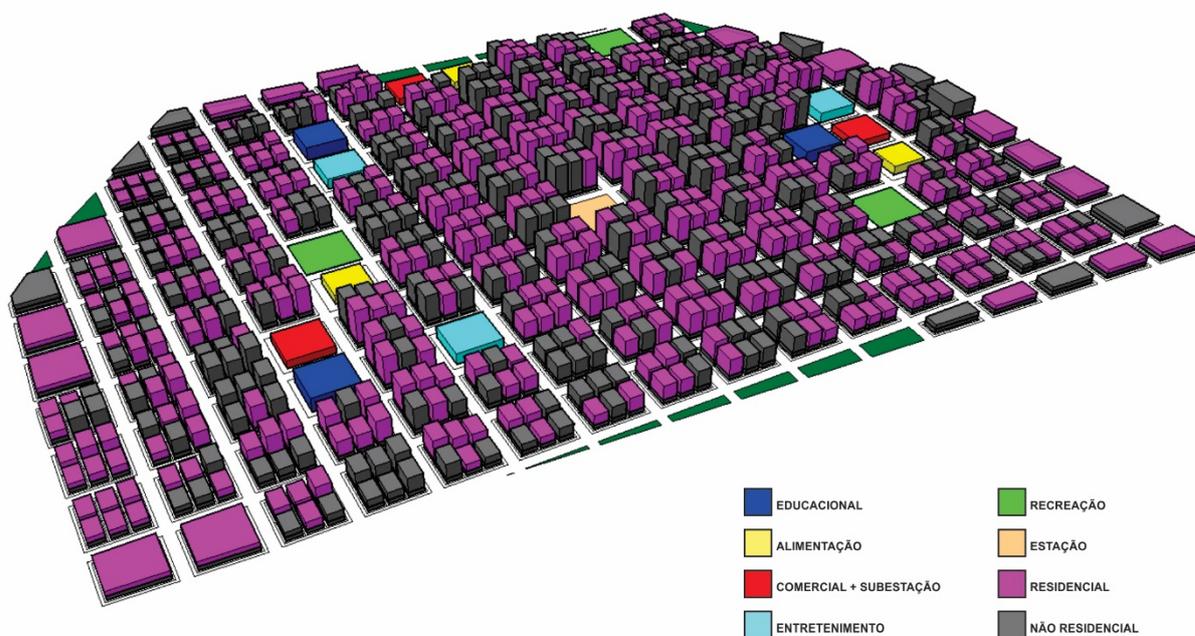


Figura 46. Distribuição parametrizada entre áreas residenciais e não residenciais, com base no Mixed-Use Index.  
Fonte: O autor.

---

<sup>57</sup> A distribuição de usos residenciais e não residenciais apresentada na Figura 47 mostra uma organização de usos uniforme e dinamicamente obtida, como forma de demonstrar o potencial do sistema em avaliar várias possibilidades de arranjo, de acordo com diferentes critérios. Desta forma, outras regras poderiam ter sido incorporadas a este experimento, de maneira a garantir que os espaços de trabalho estivessem concentrados em determinadas ruas ou eixos, por exemplo. Ou ainda, aspectos econômicos e também de qualidade dos espaços poderiam ter sido considerados para determinar ruas com maior caráter residencial e outras de comércio ou serviço.

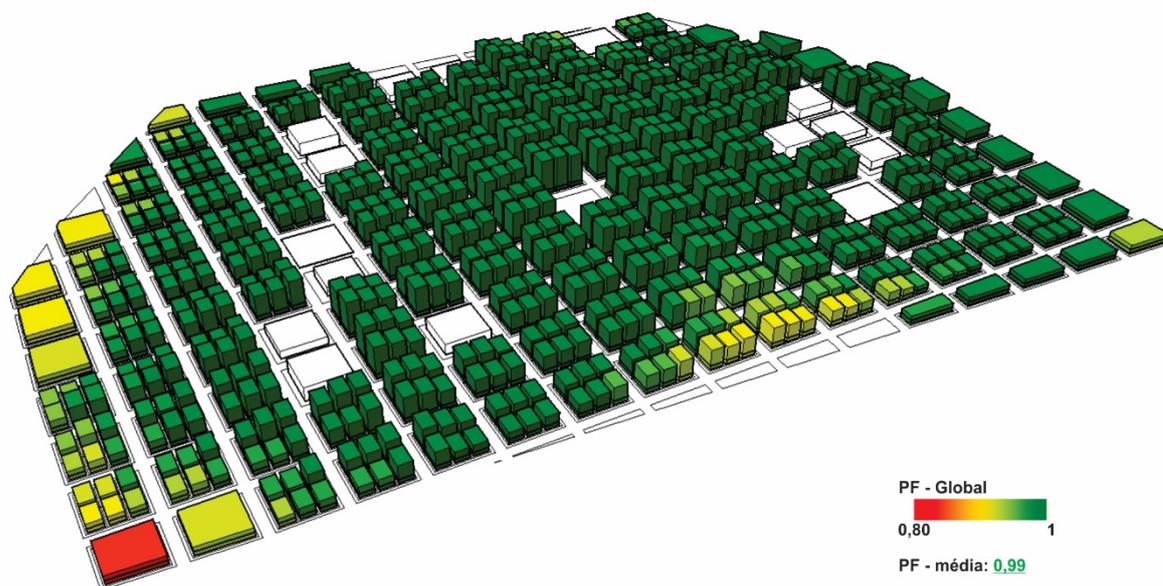


Figura 47. Índices de PF (globais) para os serviços de cada um dos edifícios propostos. Fonte: O autor.

#### 4.1.1. Resultados

A organização proposta para este bairro, algoritmicamente desenvolvida com o suporte de CityMetrics, sugere excelente acessibilidade ao transporte, uma vez que a distância média entre todos os terrenos e a estação é de 453,85m (menos de seis minutos a pé), sendo a menor distância de 12m (menos de um minuto a pé) e a maior 992m (menos de 13 minutos a pé). O arranjo otimizado dos serviços forneceu um índice de Proximidade Física para a estação médio de 0,91, com 0,51 como menor e 1 como maior pontuação. Geometrias parametricamente controladas permitiram regular variações de densidade, de modo que ela aumente de acordo com a proximidade das estações (27-353.5 unidades habitacionais por hectare), mantendo o maior número de pessoas mais perto dos nós de transportes. No entanto, a densidade de residência global média (67,7 unidades habitacionais por hectare) atende à densidade mínima residencial

necessária para suportar metrô (22,5 unidades habitacionais por hectare). O arranjo proposto para o bairro, bem como para os edifícios, visa a proporcionar usos múltiplos, com as áreas terreas reservadas a usos não residenciais. A relação entre áreas residenciais e não residenciais (MXI) foi parametricamente regulada. A fim de estabelecer uma equação equilibrada, esta experiência adotou uma proporção de 1/1, mas esta relação pode também ser modificada, rearranjando todo o sistema, de acordo com diferentes situações, demandas ou até mesmo de acordo com diferentes “vocações” ou características desejadas. A Tabela 5 apresenta informações gerais do modelo que comprovam o potencial do sistema em orientar a vizinhança proposta, de acordo com as métricas adotadas.

Tabela 5. Dados e resultados referentes ao ensaio preliminar 1.

Informações Gerais	
Área total do “bairro”	261.01 ha
Área do bairro	86.99 ha
Número total de quadras	156
Dimensões quadras “típicas”	62x65m
Total de quadras “típicas”	131
Largura das ruas	12m
Total de quadras “atípicas”	25
Total de lotes	721
Total de lotes “típicos”	696
Dimensões dos lotes “típicos”	19.7x28m
Total de lotes “atípicos”	25

Caminhabilidade			
Índices de Proximidade Física p/ serviços (Parciais)			
Categoria	Menor	Média	Maior
Educacional	0,87	0,99	1
Alimentação	0,77	0,99	1
Comércio	0,82	0,99	1
Entretenimento	0,83	0,99	1
Recreação	0,71	0,99	1
Índices de Proximidade Física p/ serviços (Globais)			
Menor	Média	Maior	
0,83	0,99	1	

Acessibilidade ao Transporte		
Distâncias entre os lotes e a estação		
Menor	Média	Maior
12m	453,85m	992m
Índices de Proximidade Física p/ estação		
Menor	Média	Maior
0,51	<b>0,91</b>	1

Diversidade e Densidade			
Índ. Uso Misto (MXI)	Residencial	Ñ-Residencial.	
		0,5	0,5
Spacematrix			
FSI	GSI	N	
2,74	0,39	0,05	
Densidade Populacional (un. Hab./ha)			
Menor	Média	Maior	Modal
27	67,7	353,5	Metrô

#### 4.2. Ensaio preliminar 2 – Evolução da prova de conceito

O presente ensaio preliminar se desenvolve como uma evolução da prova de conceito apresentada no ensaio preliminar 1, uma vez que mantém a estrutura e os objetivos do primeiro experimento, introduzindo, porém, uma modificação fundamental: as tarefas de otimização passaram a ser elaboradas em lógica de múltiplas funções-objetivo (*plugin* Octopus). Pretende-se, assim, proporcionar uma melhor compreensão sobre a influência dos diferentes métodos de otimização empregados (uni e multi-objetivo). Neste sentido, sob o ponto de vista metodológico, adotar otimizações multicritério implicou em rearranjar a maneira como as perguntas (problemas) foram elaboradas e na forma como as respostas (soluções) foram fornecidas. A Figura 48, a Figura 49 e a Figura 50 apresentam a lógica do experimento em questão.

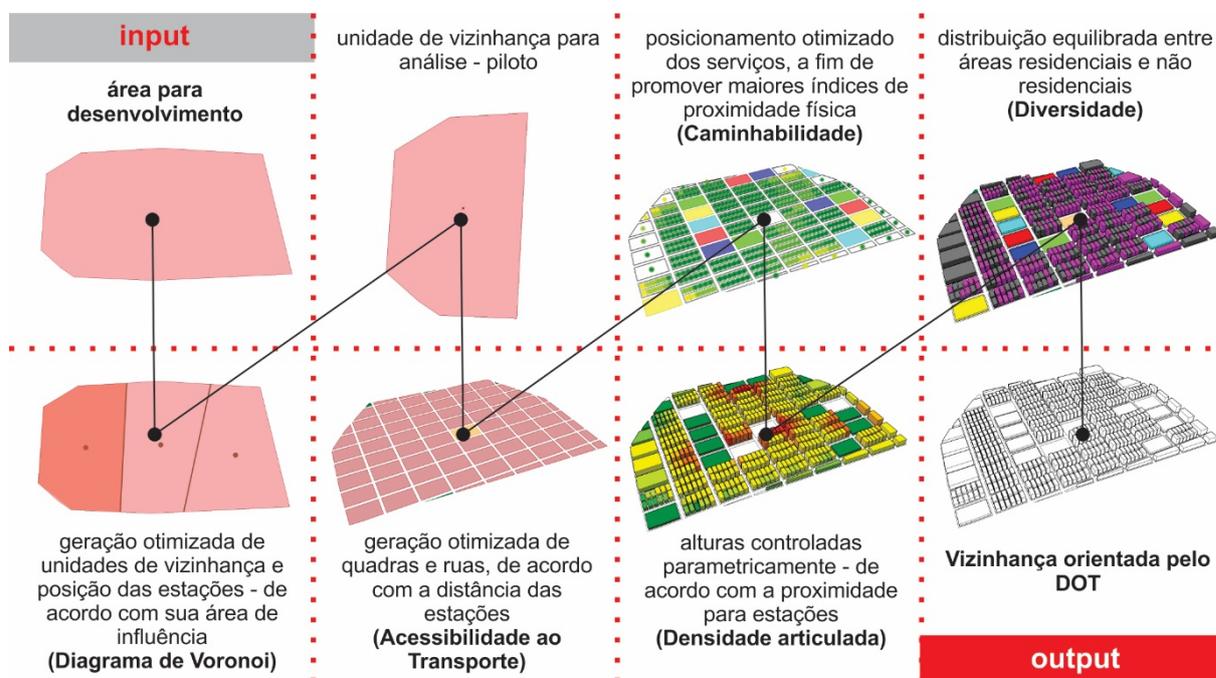


Figura 48. Sequência de etapas do referente ao ensaio preliminar 2. Fonte: O autor.

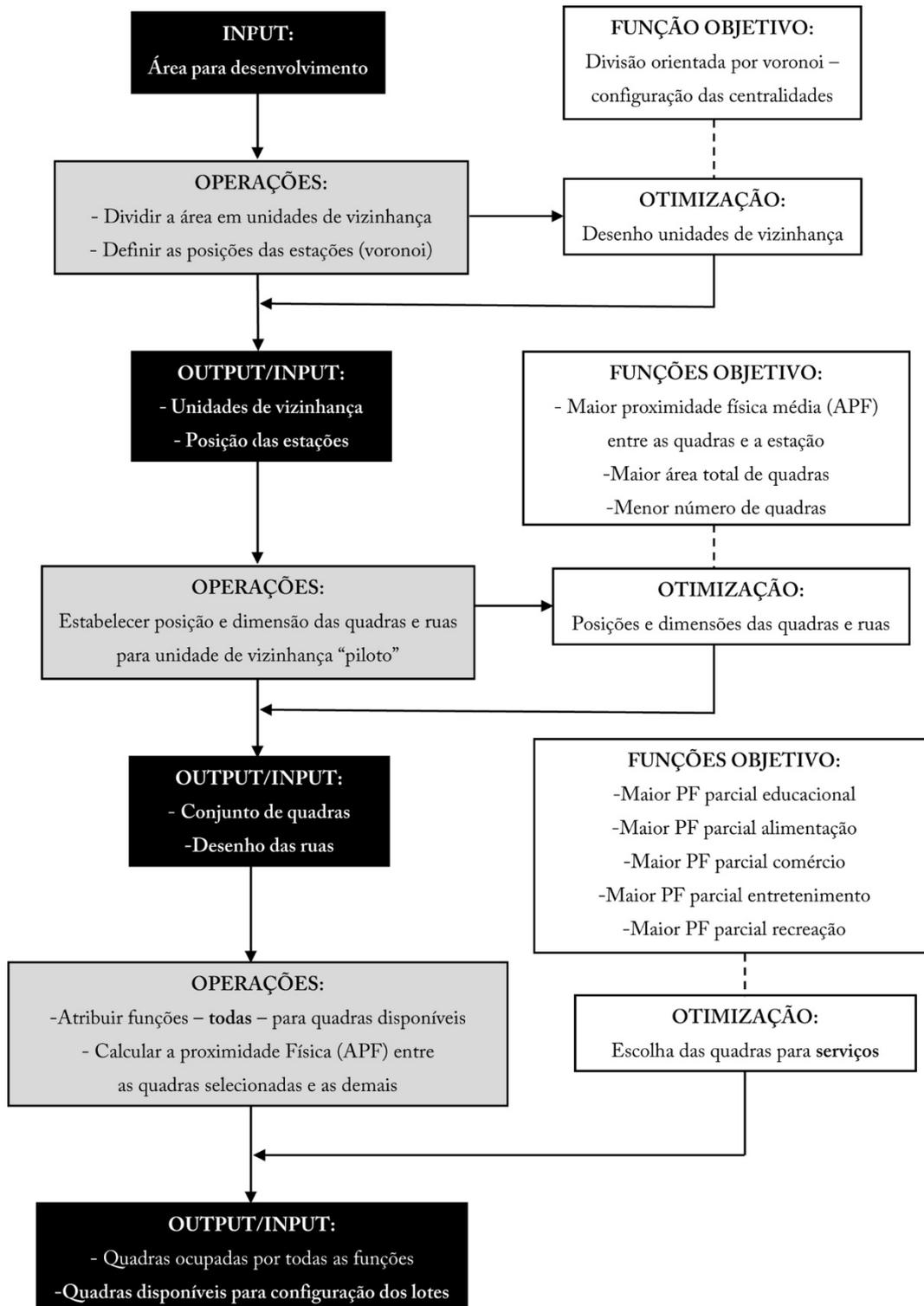


Figura 49. Descrição detalhada do experimento referente ao ensaio preliminar 2, Parte 1. As diretrizes e os *inputs* são os mesmos do experimento anterior, entretanto, a utilização de otimização multicritério significou a diminuição do número de etapas e uma nova dinâmica para este segundo ensaio preliminar. Fonte: O autor.

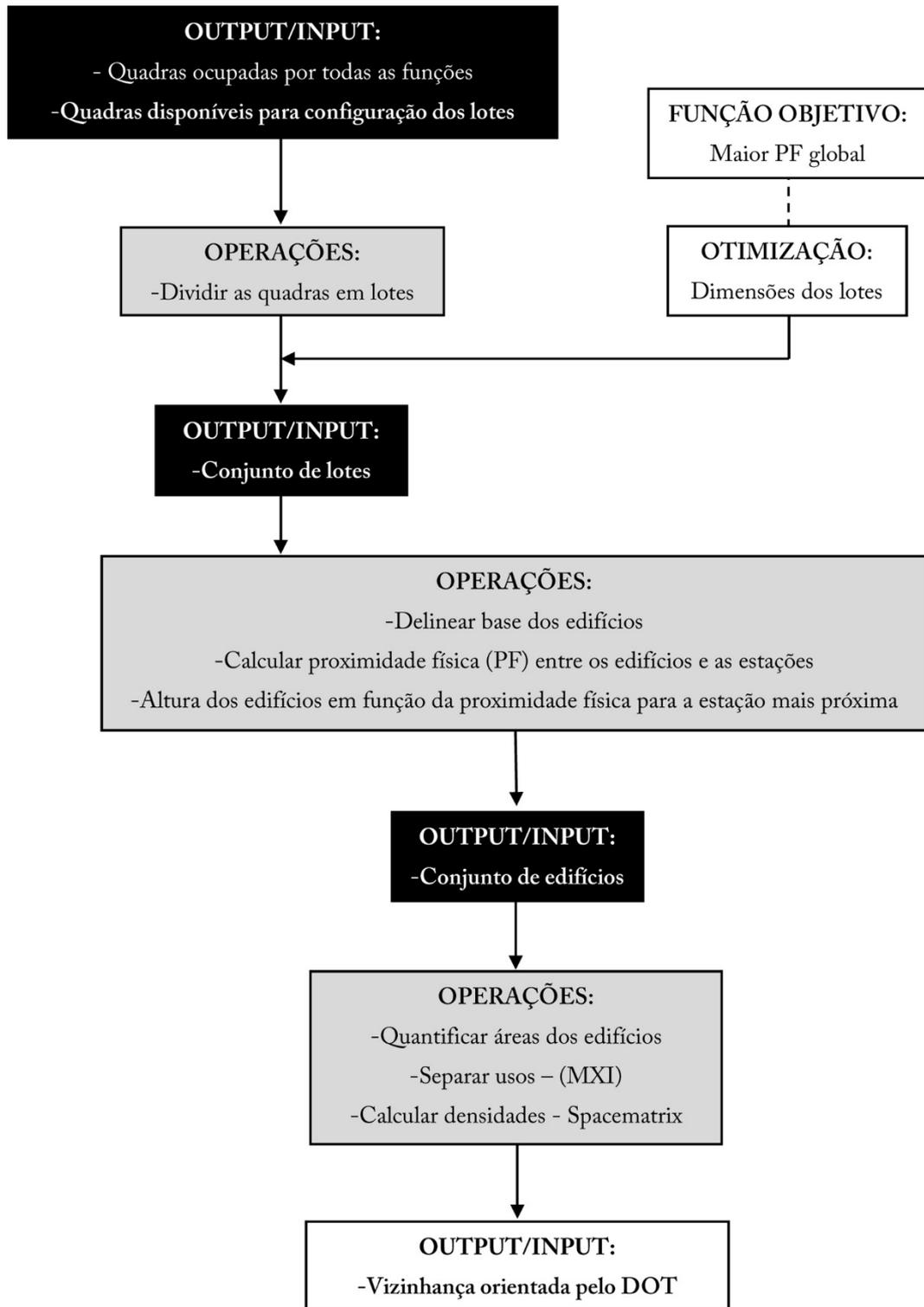


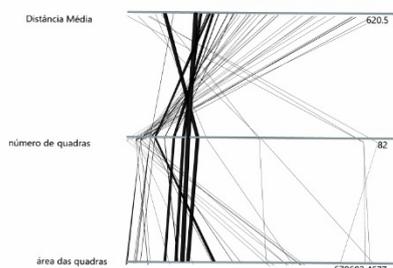
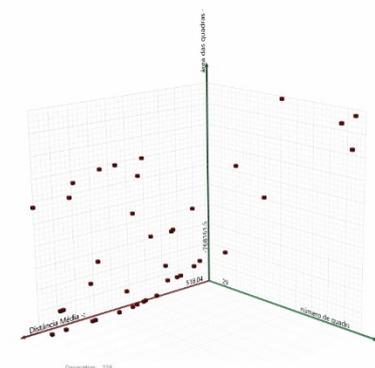
Figura 50. Descrição detalhada do experimento referente ao ensaio preliminar 2. Parte 2. Fonte: O autor.

O desenvolvimento deste segundo ensaio preliminar tem como input inicial a unidade de vizinhança já configurada na etapa inicial do ensaio preliminar anterior. Isto significa dizer que as primeiras operações deste experimento utilizam os resultados das etapas iniciais do primeiro ensaio preliminar, ou que a divisão da área total para desenvolvimento e a geração da unidade de vizinhança piloto para análise são idênticas, o que é fundamental para uma comparação mais criteriosa e adequada entre os experimentos.

A partir daí, as operações que definiram a otimização do desenho e do dimensionamento das quadras e ruas da unidade de vizinhança piloto seguiram as mesmas regras, mas considerando a utilização de mais de uma função objetivo para otimização. Isto significa dizer que, se no primeiro ensaio preliminar as tarefas de otimização buscaram fornecer uma configuração que promovesse unicamente a maior Proximidade Física (PF) média entre todas as quadras e a estação, no segundo experimento pôde-se procurar por uma solução que satisfizesse simultaneamente a múltiplos aspectos conflitantes entre si. Assim, buscou-se refinar os critérios de otimização, procurando por um melhor aproveitamento de infraestrutura. Optou-se, então, por encontrar configurações que proporcionassem as seguintes condições: a) a maior Proximidade Física (PF) média entre todas as quadras e a estação; b) o menor número possível de quadras, e; c) a maior área total possível para ocupação das quadras.

A otimização multi-objetivo forneceu uma série de soluções ótimas, ou soluções de Pareto, conforme demonstram os gráficos da Figura 51. Neste caso, dentre o conjunto de soluções disponíveis, optou-se por aquela que priorizasse a maior área total possível para ocupação das quadras, de maneira a promover um melhor “aproveitamento” do solo e menor dispêndio com infraestrutura.

**Quais configurações fornecem a melhor relação entre a maior proximidade física, a maior área total das quadras e o menor número de quadras ? (Fronteira de Pareto)**



NUMBER OF BLOCKS	TOTAL AREA OF BLOCKS	AVERAGE DISTANCE - BLOCKSSTATIONS
79	681015 m <sup>2</sup>	518.038462

### solução adotada

- Dimensões das quadras: 81x133m
- Largura das ruas: 13m
- Quantidade de quadras: 79
- Área Total das Quadras: 681015m<sup>2</sup>

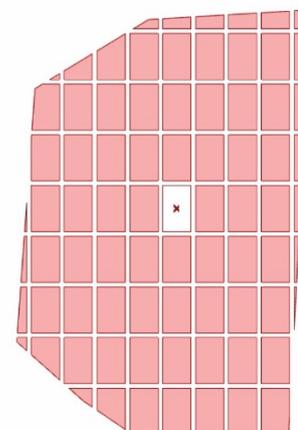


Figura 51. Gráficos apresentando o conjunto de soluções de Pareto (à esquerda) e a solução adotada para prosseguimento do ensaio preliminar (à direita). Fonte: O autor.

Após a adoção da solução otimizada para o desenho e dimensionamento das quadras e ruas, o passo seguinte foi, assim como no experimento anterior, encontrar quais seriam as melhores quadras para se inserir os serviços urbanos, considerando as mesmas categorias de serviços do ensaio preliminar anterior para o cálculo da caminhabilidade. Assim, o APF foi utilizado para estimar os índices de Proximidade Física (PF) parciais de todas as quadras do bairro, utilizando também o *plugin* Octopus para otimização. Este procedimento, diferente do ensaio preliminar 1, possibilitou abordar simultaneamente todas as cinco categorias de serviços consideradas, apontando, em uma única operação, uma série de configurações ótimas para o posicionamento dos serviços. Em uma tarefa subsequente, os índices de PF globais foram utilizados para otimizar a divisão das quadras em lotes. A Figura 52 ilustra as quadras ocupadas pelos serviços, além dos lotes e dos índices de PF parciais e globais obtidos.

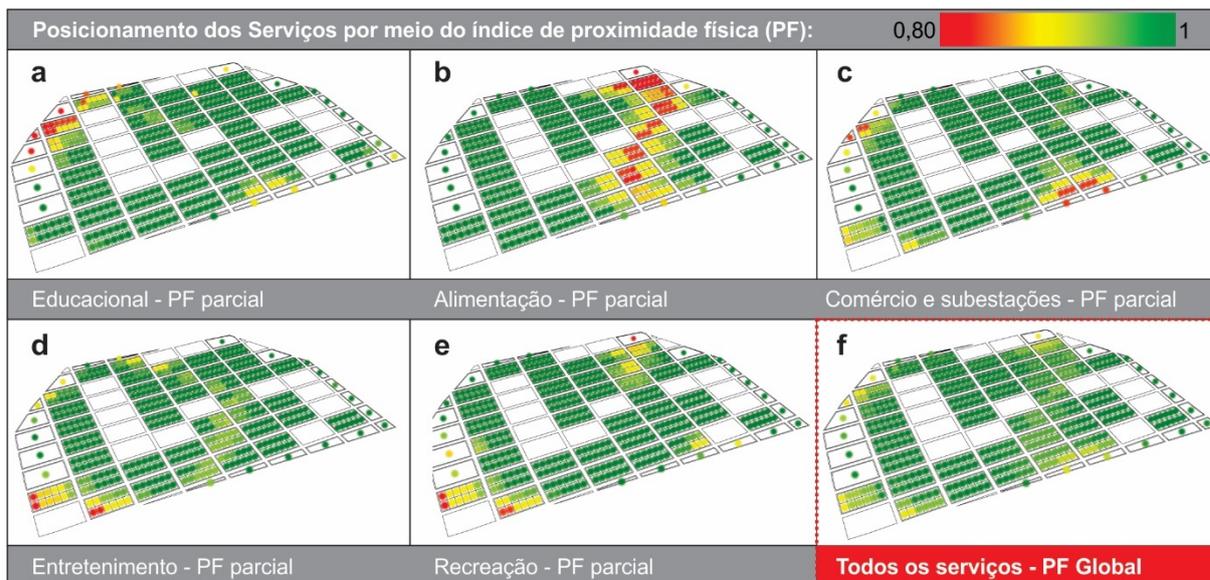


Figura 52. Processo de otimização do índice de Proximidade Física (PF) para posicionamento dos serviços. Neste segundo experimento, as categorias de serviços foram abordadas simultaneamente, o que significou um número significativamente menor de operações. Fonte: O autor.

O ambiente paramétrico e o algoritmo para cálculo dos indicadores Spacematrix permitiram, mais uma vez, uma avaliação articulada e dinâmica das geometrias urbanas, por meio da análise de diferentes cenários de ocupação. As densidades mínimas residenciais necessárias para apoiar diferentes modais de transporte foram exploradas – assim como no primeiro experimento. Neste contexto, foi possível relacionar as alturas das edificações de acordo com as distâncias dos lotes para a estação principal ou para uma das subestações, posicionadas nas quadras indicadas para o comércio, conforme ilustra a Figura 53.

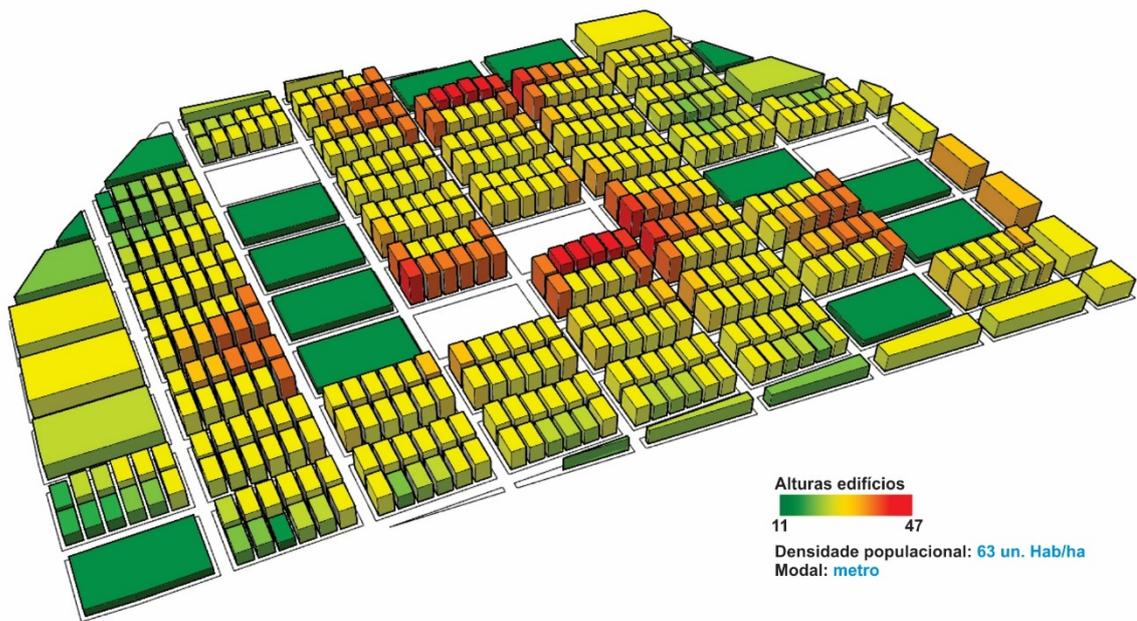


Figura 53. Controle paramétrico das alturas das edificações e da densidade da área analisada. O arranjo das geometrias das edificações foi elaborado de maneira a atender à densidade populacional necessária ao modal adotado, bem como à permitir maiores alturas (e, conseqüentemente, concentração de pessoas) de acordo com a PF para a estação ou subestações Fonte: O autor.

O Algoritmo de Uso Misto (AMXI), mais uma vez, proporcionou uma distribuição equilibrada entre áreas residenciais e não residenciais, resultando em um Mixed-Use Index de 0,5. A Figura 54 e a Figura 55 apresentam as configurações de usos e a Proximidade Física dos edifícios propostos, respectivamente.

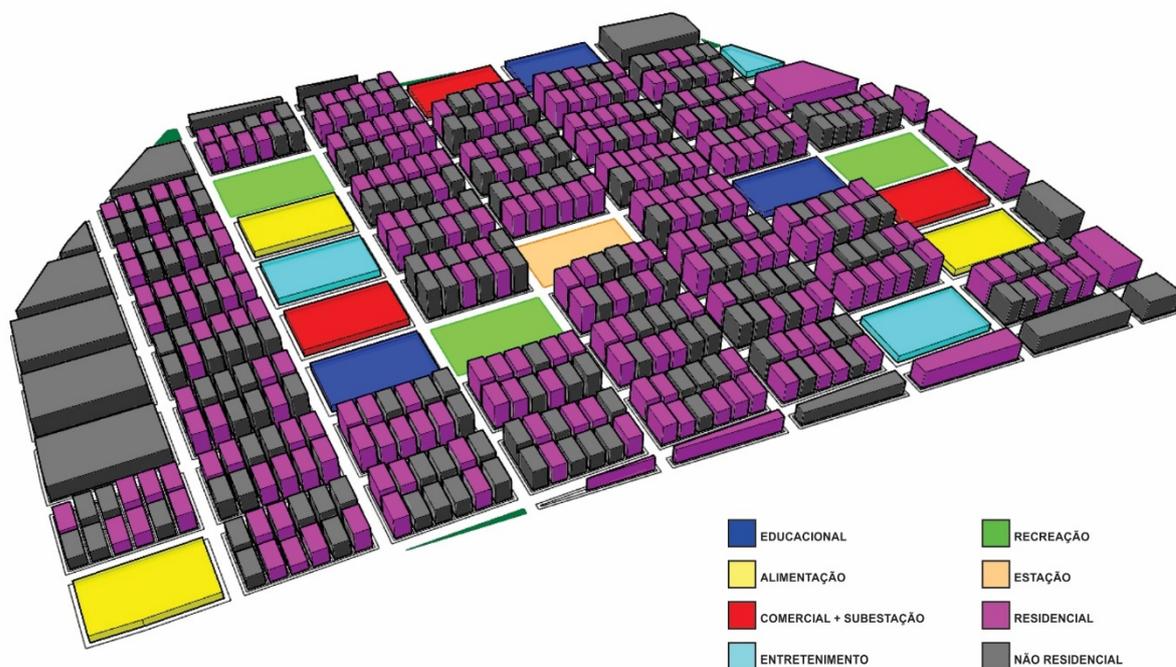


Figura 54. Distribuição parametrizada entre áreas residenciais e não residenciais, com base no Mixed-Use Index. Fonte: O autor.

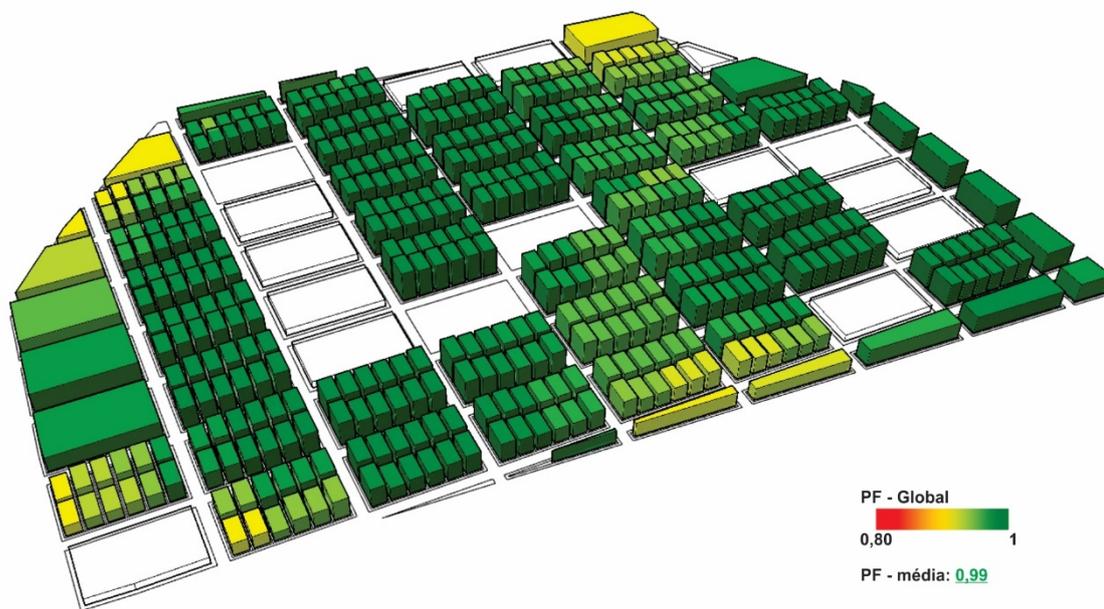


Figura 55. Índices de Proximidade Física (globais) de cada um dos edifícios propostos algoritmicamente. Fonte: O autor.

### 4.2.1. Resultados

A organização proposta para este segundo ensaio preliminar<sup>58</sup> sugere uma acessibilidade ao transporte ainda melhor que a do primeiro experimento, uma vez que a distância média entre todos os terrenos e a estação é ligeiramente menor do que a do caso anterior: 450,82m (menos de seis minutos a pé), sendo a menor distância de 9m (menos de um minuto a pé) e a maior 955m (menos de 13 minutos a pé). O arranjo otimizado das quadras e lotes forneceu um índice de Proximidade Física para a estação médio de 0,91, com 0,54 como menor e 1 como maior pontuação. As geometrias urbanas parametricamente controladas permitiram, mais uma vez, regular variações de densidade, crescentes de acordo com a proximidade para as estações (33-175,7 unidades habitacionais por hectare), mantendo um grande número de pessoas mais perto dos nós de transportes. No entanto, a densidade residencial global média (108,5 unidades habitacionais por hectare) atende plenamente à densidade mínima residencial necessária para suportar metrô (22,5 unidades habitacionais por hectare). A relação entre áreas residenciais e não residenciais (MXI) foi novamente regulada parametricamente. A Tabela 6 apresenta informações gerais do modelo.

---

<sup>58</sup> O arranjo espacial deste experimento partiu, assim como no ensaio preliminar anterior, da premissa de configurar as quadras que abrigariam os serviços propostos como “exclusivas” para seus respectivos usos, de maneira a possibilitar a inserção de equipamentos (e espaços urbanos) maiores. Se, por uma determinada ótica, esta configuração cria algumas distorções, por outra, permite uma configuração diferenciada para as quadras que possuem usos específicos e que são, de uma certa forma, estratégicas.

Tabela 6. Dados e resultados referentes ao ensaio preliminar 2.

Informações Gerais	
Área total do "bairro"	261.01 ha
Área do bairro	86.99 ha
Total de quadras	75
Dimensões quadras "típicas"	81x133m
Total de quadras "típicas"	51
Largura das ruas	13m
Total de quadras "atípicas"	24
Total de lotes	492
Total de lotes "típicos"	456
Dimensões lotes "típicos"	21x37,5m
Total de lotes "atípicos"	36

Caminhabilidade			
Índices de Proximidade Física p/ serviços (Parciais)			
Categoria	Menor	Média	Maior
Educacional	0,80	0,97	1
Alimentação	0,70	0,97	1
Comércio	0,84	0,98	1
Entretenimento	0,82	0,99	1
Recreação	0,82	0,99	1
Índices de Proximidade Física p/ serviços (Globais)			
Menor	Média	Maior	
0,80	0,98	1	

Acessibilidade ao Transporte			
Distâncias entre os lotes e a estação			
Menor	Média	Maior	
9m	450,82m	955m	
Índices de Proximidade Física p/ estação			
Menor	Média	Maior	
0,54	0,91	1	

Diversidade e Densidade			
Índ. Uso Misto (MXI)	Residencial	Ñ-Residencial.	
	0,5	0,5	
Spacematrix			
FSI	GSI	N	
4.02	0,50	0,04	
Densidade Populacional (un. Hab./ha)			
Menor	Média	Maior	Modal
33	108,5	175,7	Metrô

### *4.3. Ensaio preliminar 3 – Otimização multi-objetivo em área existente*

O ensaio preliminar 3 consiste na avaliação da implementação de CityMetrics em uma unidade de vizinhança existente, de maneira a permitir avaliar a aplicação do sistema e das ferramentas propostas em um contexto urbano já consolidado, com um maior número de restrições e condicionantes. Desta maneira, o principal objetivo deste ensaio preliminar é o de avaliar o potencial de CityMetrics em adequar uma área urbana existente aos princípios mensuráveis do DOT abordados pelas métricas e ferramentas elaboradas.

A área urbana escolhida para estudo foi o bairro Cascatinha, localizado na cidade de Juiz de Fora, Minas Gerais. Apesar de ser predominantemente residencial, o bairro em questão possui grande potencial para uma organização baseada nos princípios do DOT, apresentando algumas características que o credenciam como uma amostra adequada para a avaliação de CityMetrics, tais como: a) extensão adequada para implementação do DOT (aproximadamente 1 km de diâmetro); b) densidade relativamente baixa; c) nenhuma estação de transporte – e, portanto, demanda para implementação de uma; d) complexidade topográfica; e) áreas disponíveis para novas construções; f) proximidade de serviços relevantes, como um parque, um hospital, uma universidade e um centro comercial, entre outros, e; g) uma boa posição na rede urbana, ligando diretamente o centro da cidade a outras regiões do município. Estes aspectos proporcionam um cenário adequado para avaliar o sistema proposto, pois, além de demonstrar os problemas típicos do modelo de cidade espalhada, uma situação encontrada em vários centros urbanos em todo o mundo, também apresenta algumas importantes restrições e condicionantes para avaliar a implementação de CityMetrics. A Figura 56 apresenta o bairro estudado, a Figura 57 ilustra a estrutura básica do experimento e a Figura 58 detalha as operações executadas.

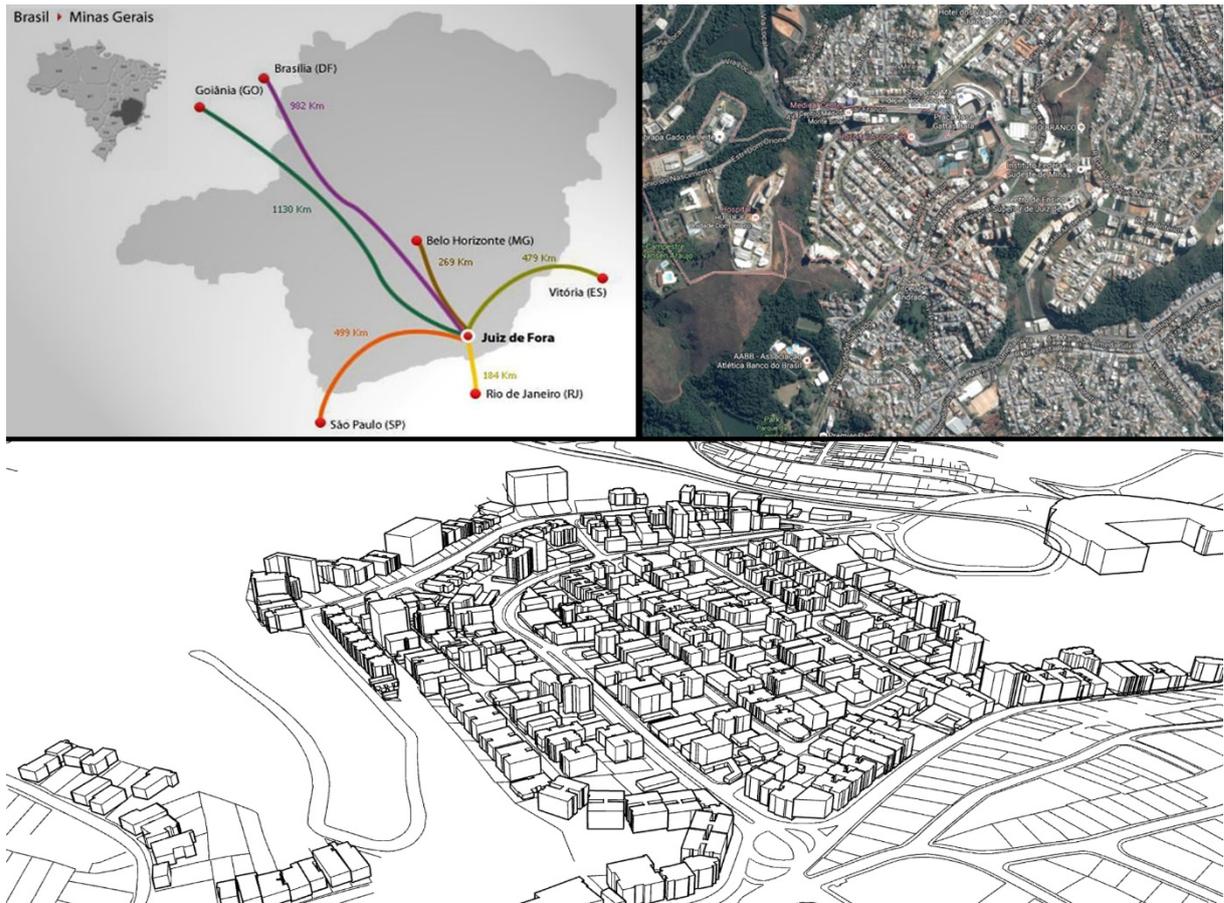


Figura 56. Posição da cidade de Juiz de Fora (acima à esquerda), imagem aérea do bairro Cascatinha (acima à direita) e imagem 3D do bairro (abaixo). Fonte: O autor.

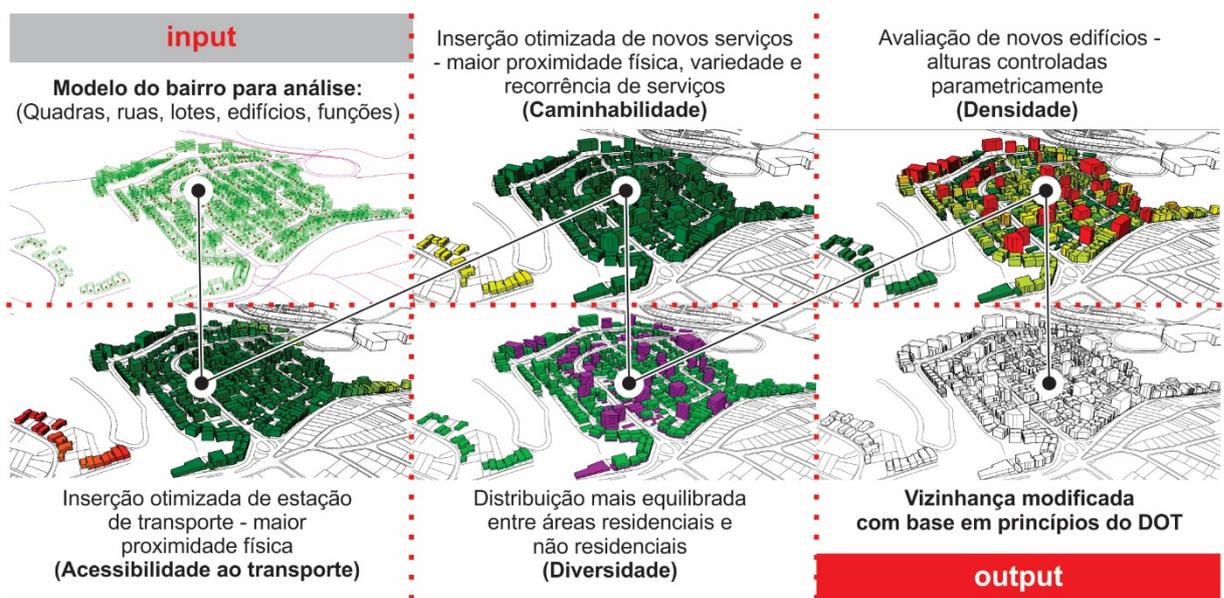


Figura 57. Sequência de etapas do experimento referente ao ensaio preliminar 3. Fonte: O autor.

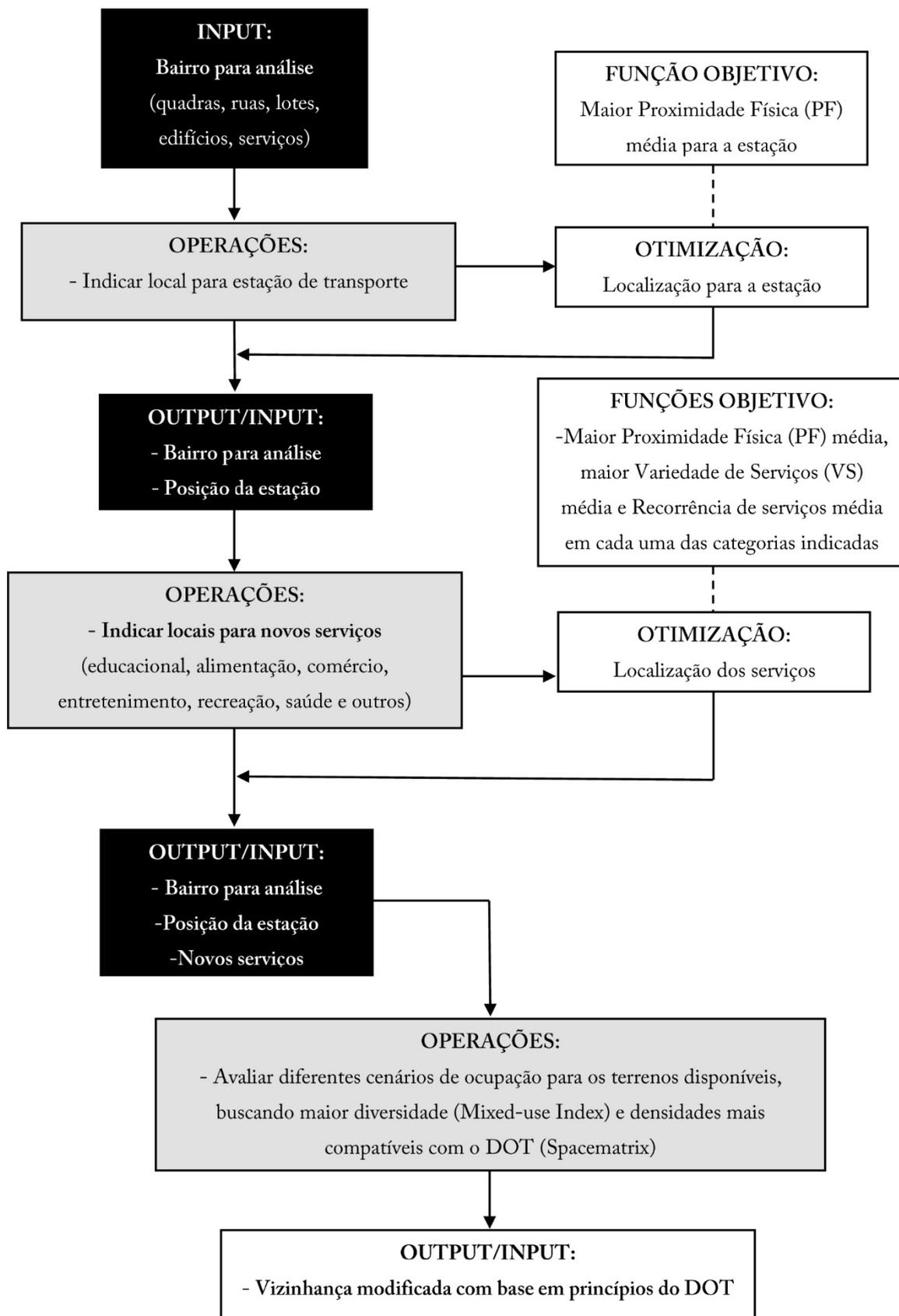


Figura 58. Descrição detalhada do experimento referente ao ensaio preliminar 3. Fonte: O autor.

Neste contexto, foram obtidas e transferidas as seguintes informações para o modelo de análise:

- a) os desenhos, número de pavimentos, usos e posicionamento topográfico de cada edificação existente, a fim de calcular distâncias, trajetos, caminhos possíveis de conexão e aferir diversidade e indicadores de densidade;
- b) a localização de cada um dos serviços no bairro e em seus arredores, de acordo com as categorias consideradas (e. g. educacional, alimentação, comércio, entretenimento, recreação, saúde e outros) para mensurar a caminhabilidade, por meio da Proximidade Física (PF), da Variedade de Serviços (VS) e da Recorrência dos Serviços (RS) no bairro;
- c) as áreas disponíveis para novas construções (lotes vagos e construções não consolidadas), visando a proporcionar espaço para a proposição de novas construções que possam incrementar a diversidade da área;
- d) o desenho topográfico das ruas do bairro, com vistas a considerar trajetos, distâncias e inclinações para cálculos de proximidade, e;
- e) o desenho de quadras e lotes, de modo a proporcionar a avaliação da densidade por meio dos indicadores Spacematrix. A Figura 59 ilustra o modelo utilizado.



Figura 59. Imagem de parte do modelo de análise utilizado no experimento referente ao ensaio preliminar 3. Ruas, quadras, lotes e serviços emulados por entidades geométricas. Fonte: O autor.

A partir daí, a tarefa foi aplicar as operações de simulação e otimização multi-objetivo, com o objetivo de adotar uma configuração que aumentasse os indicadores de acessibilidade ao transporte, caminhabilidade e diversidade, pelas seguintes ações, respectivamente: a) procurar a melhor localização para a inserção de uma estação, uma vez que o bairro não possui uma; b) propor um novo serviço para cada categoria, buscando aumentar os seguintes índices relacionados à caminhabilidade - Proximidade Física (PF) para os Serviços, Variedade dos Serviços (VS) e Recorrência dos Serviços (RS), com um único novo serviço por categoria, e; c) avaliar diferentes estratégias de ocupação para terrenos disponíveis, considerando índice de uso misto e os indicadores Spacematrix para ajudar na análise dos impactos das soluções propostas.

A otimização multi-objetivo indicou um conjunto de soluções de pareto para serem avaliadas. Optou-se por priorizar a que proporcionou maior PF global. Entre a Figura 60 e a Figura 65, se encontram diferentes ilustrações a respeito da solução adotada.



Figura 60. Relação de Proximidade Física entre os edifícios do bairro e a estação (em azul), cuja localização foi indicada por meio de otimização. Cada edificação se encontra preenchida por uma cor que corresponde ao seu índice de PF para a estação. Fonte: O autor.

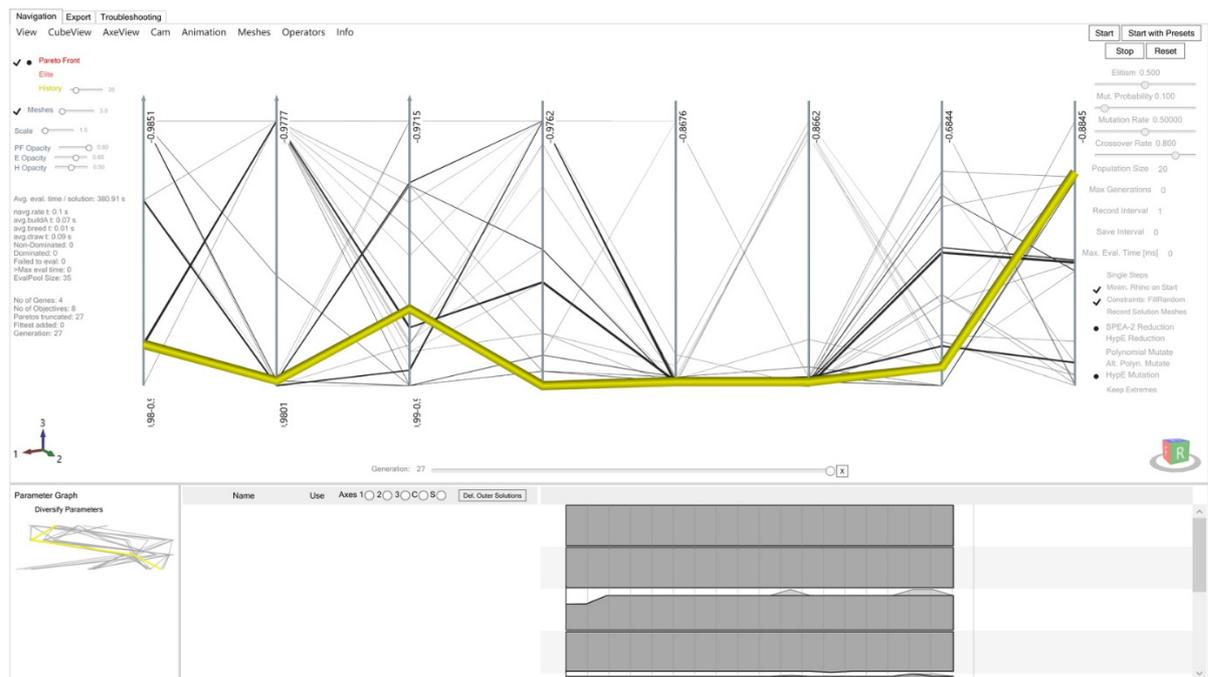


Figura 61. Interface do plugin de otimização para posicionamento dos novos serviços. Diferentes eixos ilustrando as diferentes funções-objetivo adotadas e as linhas que cruzam estes eixos representam as soluções de Pareto. Em amarelo, a solução adotada para desenvolvimento. Fonte: O autor.

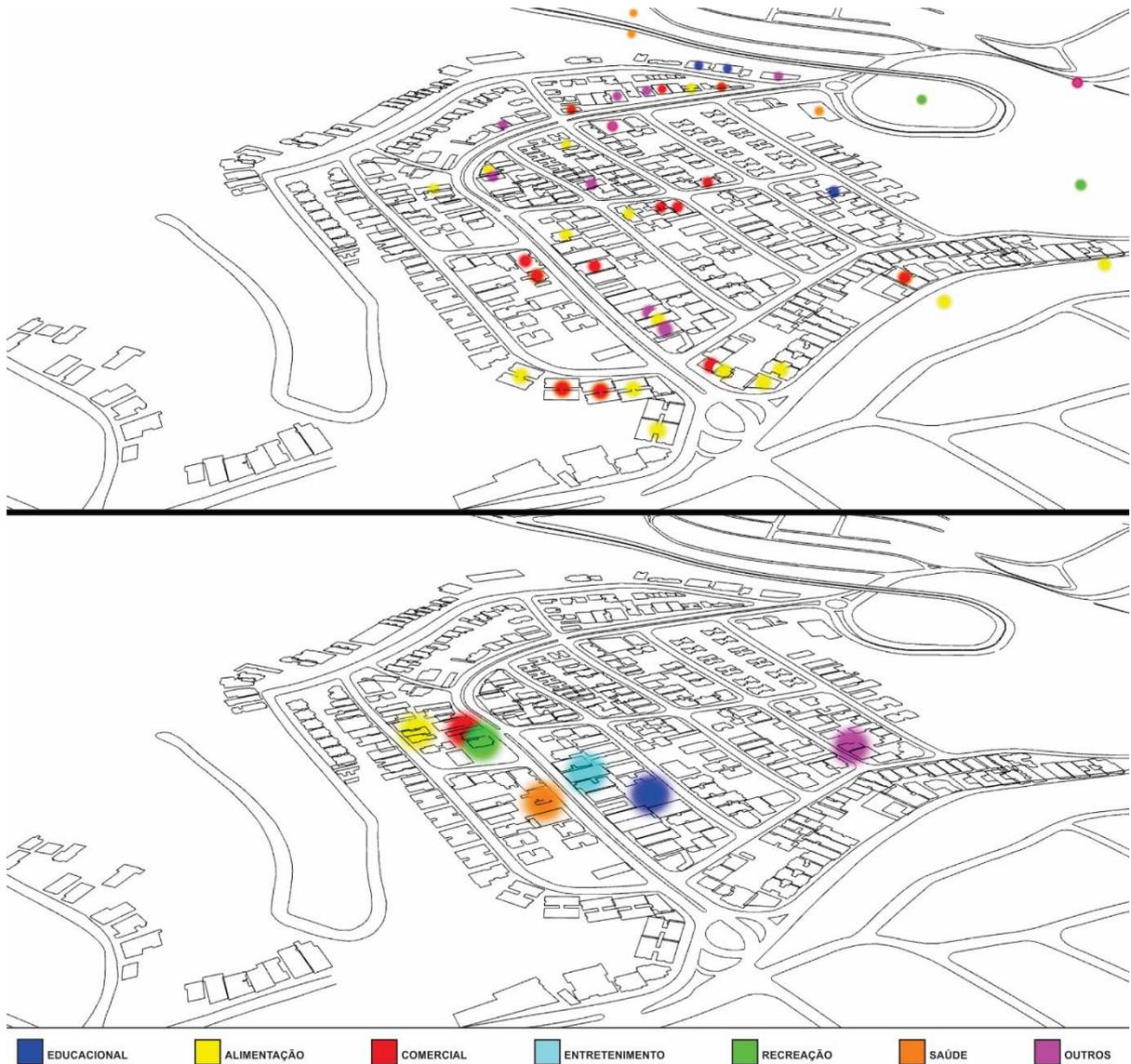


Figura 62. Localização dos serviços existentes no bairro (acima) e a proposta para inserção de novos serviços, após otimização (abaixo). Fonte: O autor.

Relação de Proximidade Física global (PF) entre cada edifício e os serviços:

0,40  1

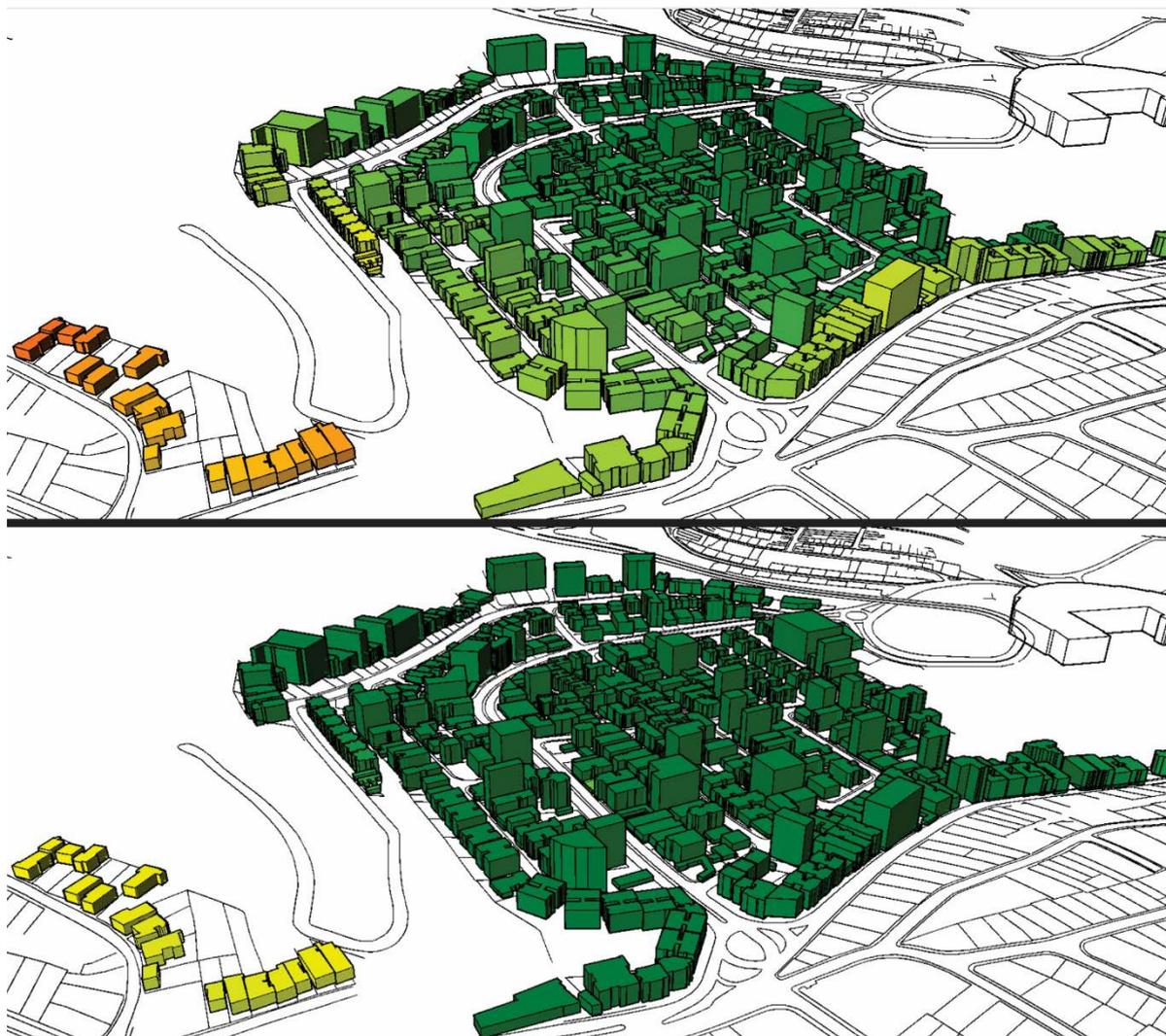


Figura 63. Relação de Proximidade Física entre os edifícios e os serviços do bairro, antes (acima) e após otimização (abaixo) para inserção de novos serviços em cada categoria. Fonte: O autor.

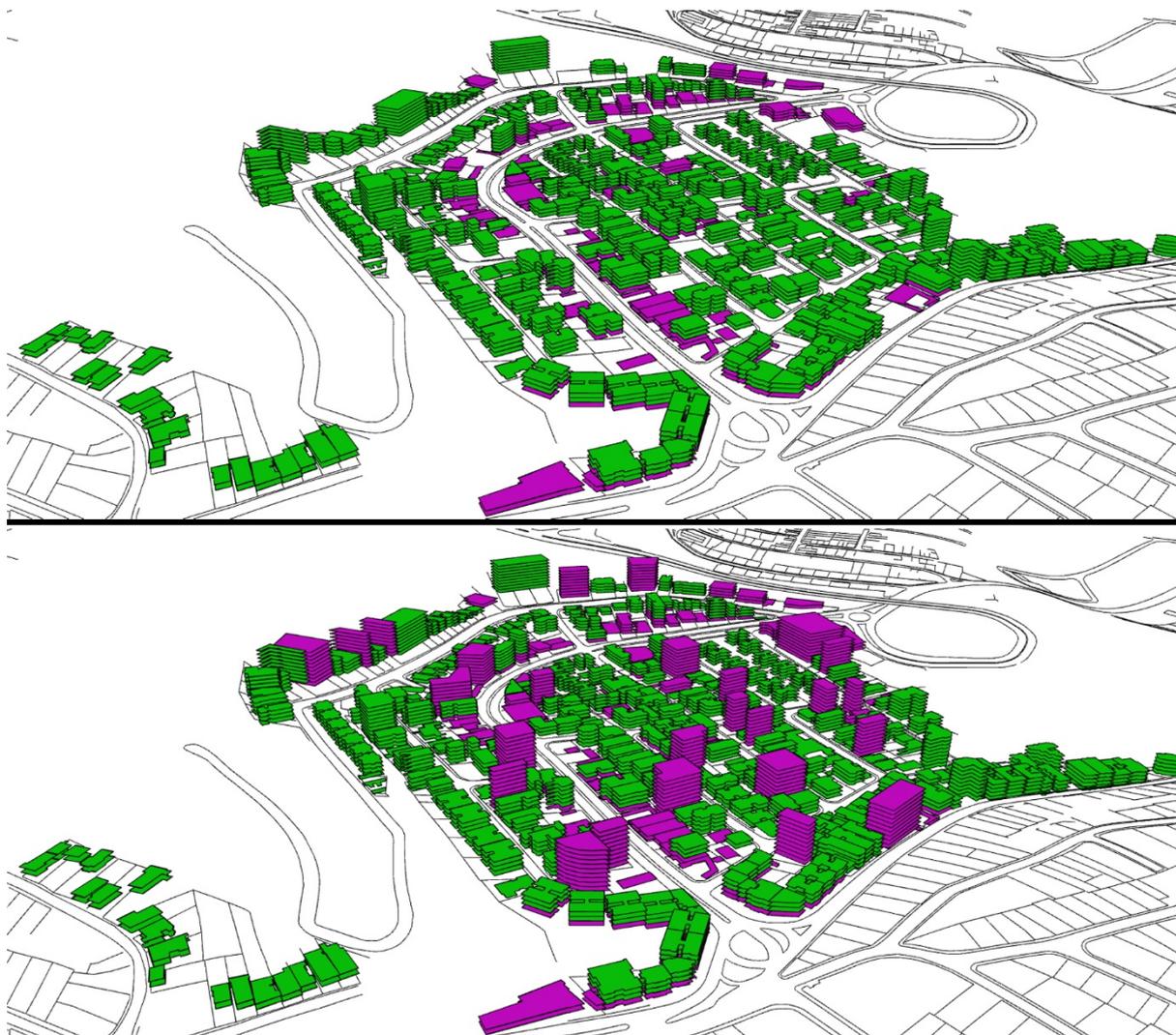


Figura 64. Distribuição de áreas residenciais (em verde) e não residenciais (em magenta), antes (acima) e após (abaixo) implementação de CityMetrics para avaliação de cenários e sugestão de modificações. As ocupações propostas proporcionam um Mixed-Use index mais equilibrado, sugerindo um bairro com maior diversidade. Fonte: O autor.

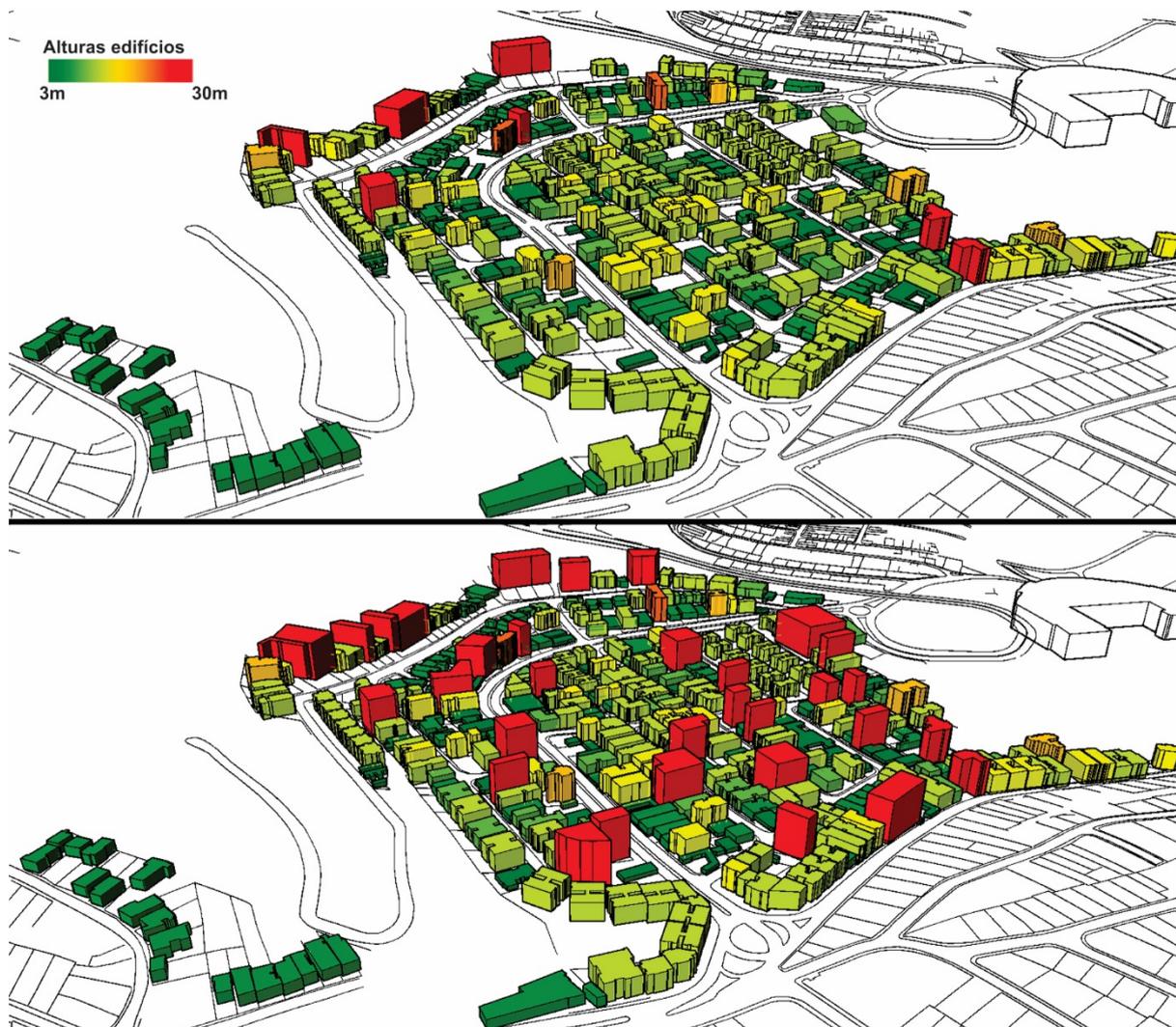


Figura 65. Estudo de alturas e de densidades após implementação de CityMetrics para avaliação de cenários. As ocupações propostas para o bairro proporcionam indicadores de densidade mais elevados e mais compatíveis com a lógica do DOT. Fonte: O autor.

#### 4.3.1. Resultados

O experimento realizado sugeriu algumas modificações na configuração do bairro, no sentido de promover um melhor desempenho no âmbito dos princípios do DOT. Em resumo, as configurações sugeridas indicam um potencial para: a) uma excelente acessibilidade ao transporte, uma vez que a inserção otimizada da estação resultou em uma elevada pontuação

média de PF para a estação. (ver Tabela 7); b) uma maior caminhabilidade, uma vez que a adição otimizada de novos serviços proporcionou um aumento dos índices de PF, VS e RS, em todas as categorias analisadas, como mostrado na Tabela 7 e na Figura 66; c) um bairro com maior diversidade, uma vez que a proposição de novos edifícios e serviços, suportada por análises em CityMetrics, resultaram em um índice de uso misto (MXI) mais equilibrado, sugerindo um maior equilíbrio entre áreas residenciais e não residenciais - ver Tabela 7, e; d) uma densidade mais adequada para um bairro DOT, pois geometrias urbanas parametricamente controladas possibilitaram regular a densidade, de maneira a aumentar a ocupação do solo e a área construída total, suportando mais pessoas (habitando ou trabalhando) mais perto do nó de transporte, como também mostra a Tabela 7:

Tabela 7. Dados e resultados referentes ao ensaio preliminar 3. Os dados obtidos após a implementação de CityMetrics se encontram sublinhados.

<b>Informações Gerais (antes/depois)</b>						
Área total do bairro		42,48 ha	<u>42,48 ha</u>			
Número total de quadras		17	<u>17</u>			
Número total de lotes		426	<u>426</u>			
Número total de edifícios		397	<u>423</u>			
<b>Acessibilidade ao Transporte</b>						
<b>Distâncias entre os lotes e a estação</b>						
Menor		Média		Maior		
<u>10m</u>		<u>343m</u>		<u>1009m</u>		
<b>Índices de Proximidade Física (IPF) p/ estação</b>						
Menor		Média		Maior		
<u>0,44</u>		<u>0,95</u>		<u>1</u>		
<b>Caminhabilidade (antes/depois)</b>						
<b>Índices de Proximidade Física (IPF) p/ serviços (Parciais)</b>						
Categoria	Menor		Média		Maior	
Educacional	0,73	<u>0,77</u>	0,97	<u>0,99</u>	1	<u>1</u>
Alimentação	0,68	<u>0,69</u>	0,98	<u>0,99</u>	1	<u>1</u>
Comércio	0,62	<u>0,62</u>	0,98	<u>0,99</u>	1	<u>1</u>
Entretenimento	0	<u>0,48</u>	0,53	<u>0,95</u>	0,96	<u>1</u>

Recreação	0,59	<b>0,82</b>	0,89	<b>0,99</b>	1	<b>1</b>
Saúde	0	<b>0,53</b>	0,80	<b>0,97</b>	1	<b>1</b>
Outros	0,56	<b>0,56</b>	0,97	<b>0,98</b>	1	<b>1</b>
<b>Índices de Proximidade Física (IPF) p/ serviços (Globais)</b>						
<b>Menor</b>		<b>Média</b>		<b>Maior</b>		
0,54	<b>0,68</b>	0,88	<b>0,98</b>	0,99	<b>1</b>	
<b>Índices de Variedade de Serviços (IVS) (Parciais)</b>						
<b>Categoria</b>	<b>Menor</b>		<b>Média</b>		<b>Maior</b>	
Educacional	0,36	<b>0,41</b>	0,59	<b>0,74</b>	0,76	<b>0,82</b>
Alimentação	0,39	<b>0,39</b>	0,88	<b>0,89</b>	0,97	<b>0,97</b>
Comércio	0,44	<b>0,44</b>	0,92	<b>0,92</b>	0,99	<b>0,99</b>
Entretenimento	0	<b>0,41</b>	0,53	<b>0,76</b>	0,96	<b>0,90</b>
Recreação	0,36	<b>0,53</b>	0,64	<b>0,74</b>	0,94	<b>0,94</b>
Saúde	0	<b>0,32</b>	0,42	<b>0,69</b>	0,79	<b>0,81</b>
Outros	0,26	<b>0,29</b>	0,91	<b>0,91</b>	1	<b>1</b>
<b>Índices de Variedade de Serviços (IVS) (Globais)</b>						
<b>Menor</b>		<b>Média</b>		<b>Maior</b>		
0,36	<b>0,44</b>	0,70	<b>0,81</b>	0,79	<b>0,87</b>	
<b>Índices de Recorrência de Serviços (IRS) (Parciais)</b>						
<b>Categoria</b>	<b>Menor</b>		<b>Média</b>		<b>Maior</b>	
Educacional	0,017	<b>0,019</b>	0,023	<b>0,026</b>	0,024	<b>0,026</b>
Alimentação	0,059	<b>0,061</b>	0,061	<b>0,064</b>	0,061	<b>0,064</b>
Comércio	0,043	<b>0,045</b>	0,043	<b>0,045</b>	0,043	<b>0,045</b>
Entretenimento	0,000	<b>0,002</b>	0,002	<b>0,005</b>	0,002	<b>0,005</b>
Recreação	0,007	<b>0,012</b>	0,012	<b>0,014</b>	0,012	<b>0,014</b>
Saúde	0,000	<b>0,007</b>	0,013	<b>0,016</b>	0,014	<b>0,017</b>
Outros	0,024	<b>0,026</b>	0,024	<b>0,026</b>	0,024	<b>0,026</b>
<b>Índices de Recorrência de Serviços (IRS) (Globais)</b>						
<b>Menor</b>		<b>Média</b>		<b>Maior</b>		
0,021	<b>0,025</b>	0,025	<b>0,028</b>	0,026	<b>0,028</b>	
<b>Diversidade e Densidade (antes/depois)</b>						
Uso Misto (MXI)	<b>Residencial</b>			<b>Ñ-Residencial.</b>		
	0,84	<b>0,61</b>	0,16	<b>0,39</b>		
<b>Spacematrix</b>						
<b>FSI</b>		<b>GSI</b>		<b>N</b>		
0,77	<b>1,06</b>	0,23	<b>0,26</b>	0,21	<b>0,21</b>	

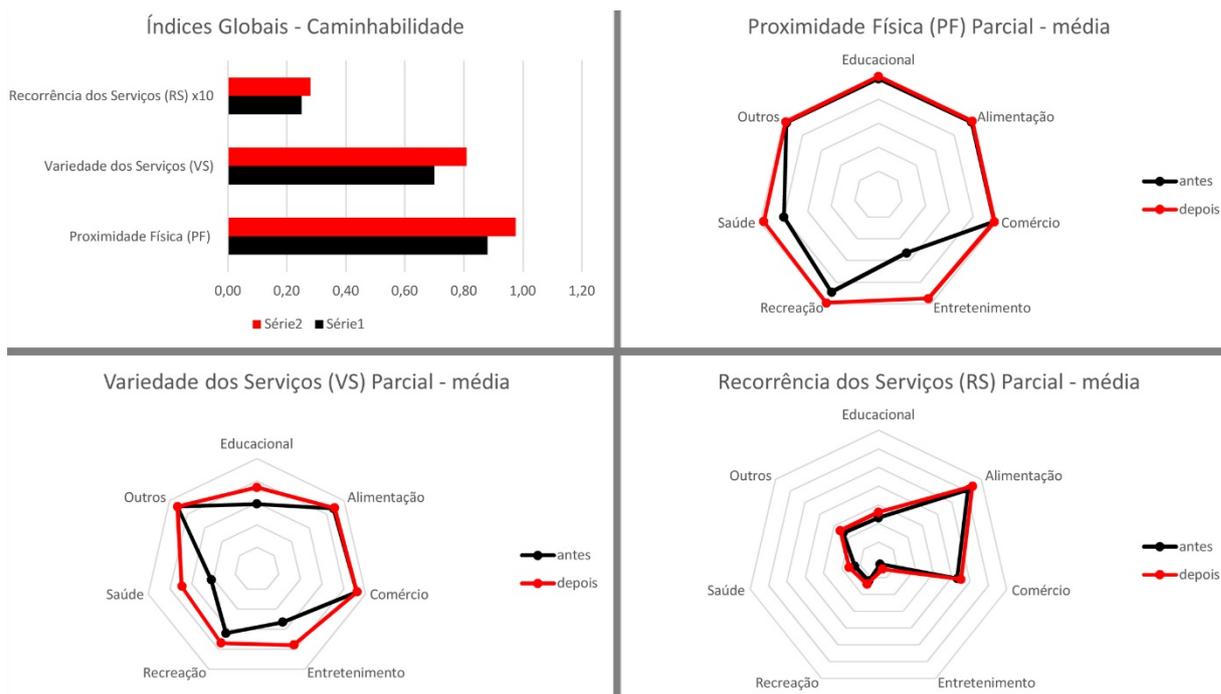


Figura 66. Gráficos ilustrando diferentes índices relacionados à caminhabilidade antes (em preto) e após (em vermelho) o experimento. Fonte: O autor.

#### 4.4. Ensaio preliminar 4 – Métricas físicas e topológicas em área existente

O ensaio preliminar 4 visa a avaliar a utilização simultânea de índices referentes a métricas físicas e topológicas, enquanto parâmetros para otimização de configurações urbanas no contexto de CityMetrics. Sendo assim, foi adotada a mesma unidade de vizinhança do ensaio preliminar 3, como amostra para o desenvolvimento dos experimentos. Apesar de os objetivos gerais dos ensaios preliminares 3 e 4 serem os mesmos (utilizar o sistema proposto para avaliar e sugerir modificações na configuração do bairro, de acordo com métricas de desempenho), a utilização de algoritmos (e de índices) que abordam métricas topológicas permitiram um diferente arranjo dos procedimentos empregados, considerando aspectos como integração dos espaços e distâncias topológicas, conforme mostra, de maneira geral, a Figura 67 e, de forma mais detalhada, a Figura 68.

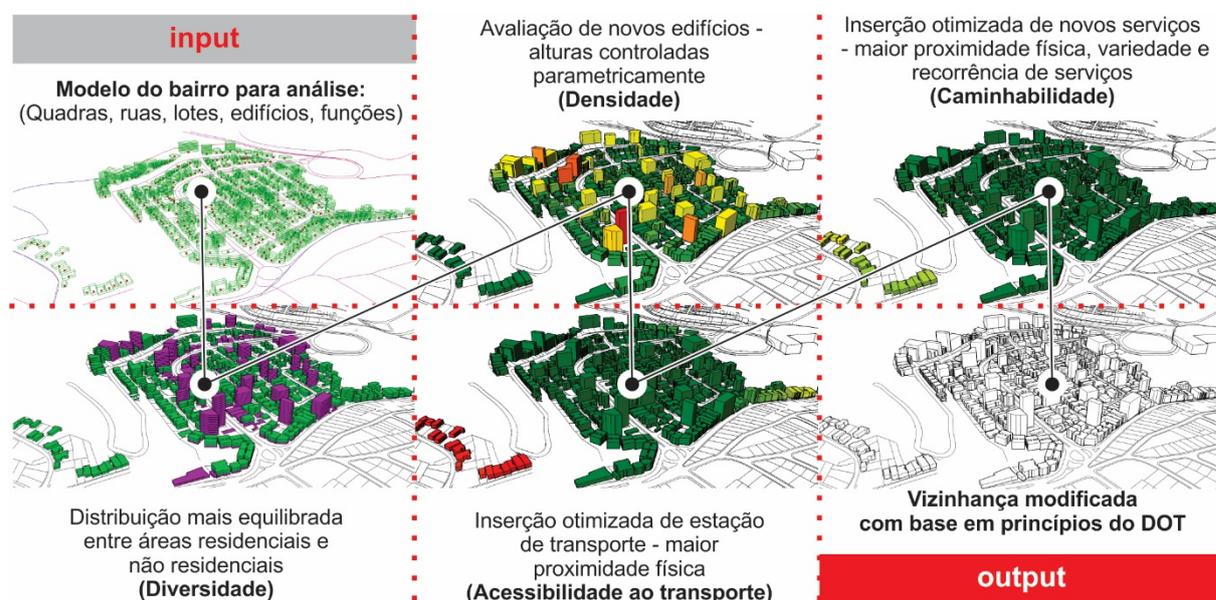


Figura 67. Sequência de etapas do experimento referente ao ensaio preliminar 4. As ferramentas introduzidas neste experimento permitiram um novo arranjo das etapas e dos resultados do ensaio preliminar em questão. Fonte: O autor.

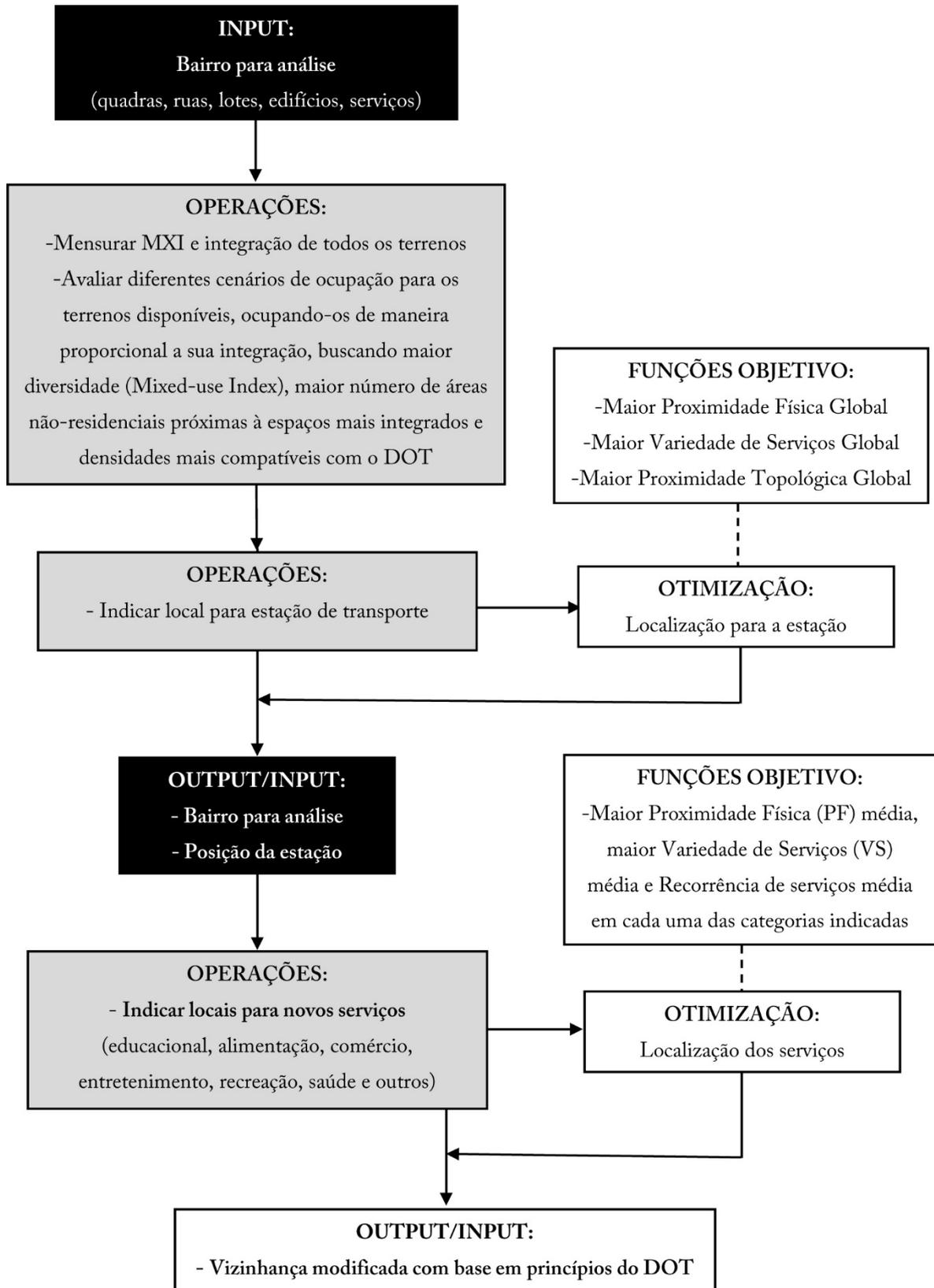


Figura 68. Descrição detalhada do experimento referente ao ensaio preliminar 4. Fonte: O autor.

Operações de simulação e otimização multi-objetivo foram executadas, com o intuito de adotar uma outra configuração que aumentasse os indicadores de acessibilidade ao transporte, caminhabilidade e diversidade, considerando também, métricas topológicas. Foram executadas as seguintes ações, sequencialmente: a) avaliar diferentes estratégias de ocupação para terrenos disponíveis, considerando o índice de uso misto (MXI) e os indicadores Spacematrix para ajudar na análise dos impactos das soluções propostas. Neste estudo de caso, o Algoritmo de Proximidade Topológica (APT) foi utilizado para calcular a integração de cada um dos lotes disponíveis, permitindo avaliar e propor cenários que partissem da premissa de indicar maiores ocupações para terrenos com maior integração – ou seja, promover maior ocupação em locais mais integrados; b) procurar a melhor localização para a inserção da estação, mas considerando pesos diferentes, de acordo com a área total construída de cada lote, para o cálculo da média ponderada. Assim, buscou-se priorizar a proximidade para locais com potencial para abrigar (habitando ou trabalhando) mais pessoas, e; c) inserir um novo serviço para cada categoria, buscando aumentar os seguintes índices relacionados à caminhabilidade - Proximidade Física (PF) para os Serviços, Variedade dos Serviços (VS), Recorrência dos Serviços (RS) e Proximidade Topológica (PT) para os Serviços com um único novo serviço por categoria.

A otimização multi-objetivo indicou um conjunto de soluções de pareto para serem avaliadas. Optou-se por priorizar a que proporcionou maior PT global. A solução adotada encontra-se ilustrada, sob diferentes aspectos, entre a Figura 69 e a Figura 74.

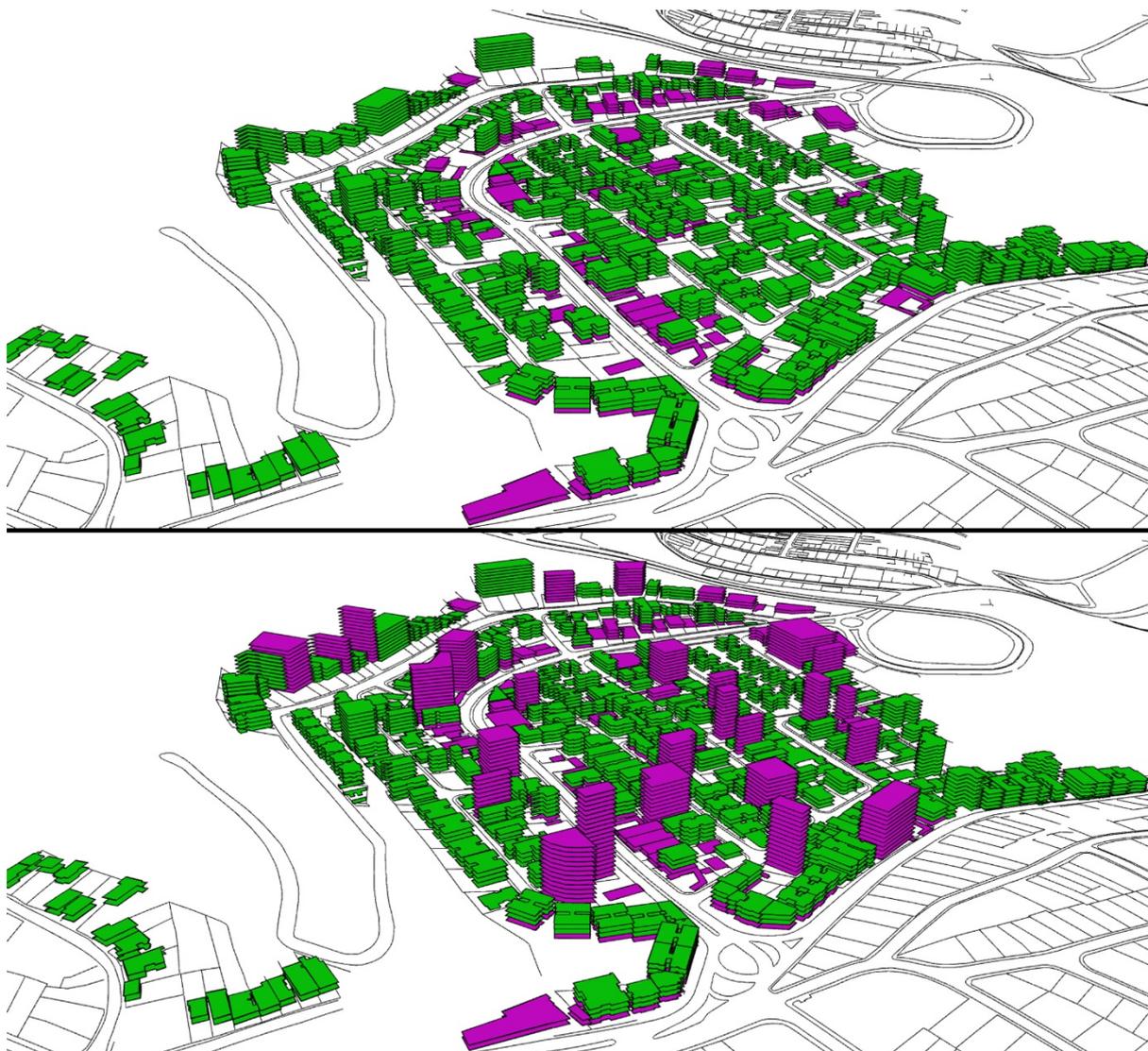


Figura 69. Distribuição de áreas residenciais (verde) e não residenciais (magenta), antes (acima) e após (abaixo) implementação de CityMetrics, para avaliação de cenários e sugestão de modificações. As ocupações dos terrenos disponíveis foram propostas proporcionalmente à integração dos lotes, visando a ocupações maiores em áreas mais integradas e proporcionar um Mixed-Use index mais equilibrado, sugerindo um bairro com maior diversidade. Fonte: O autor.

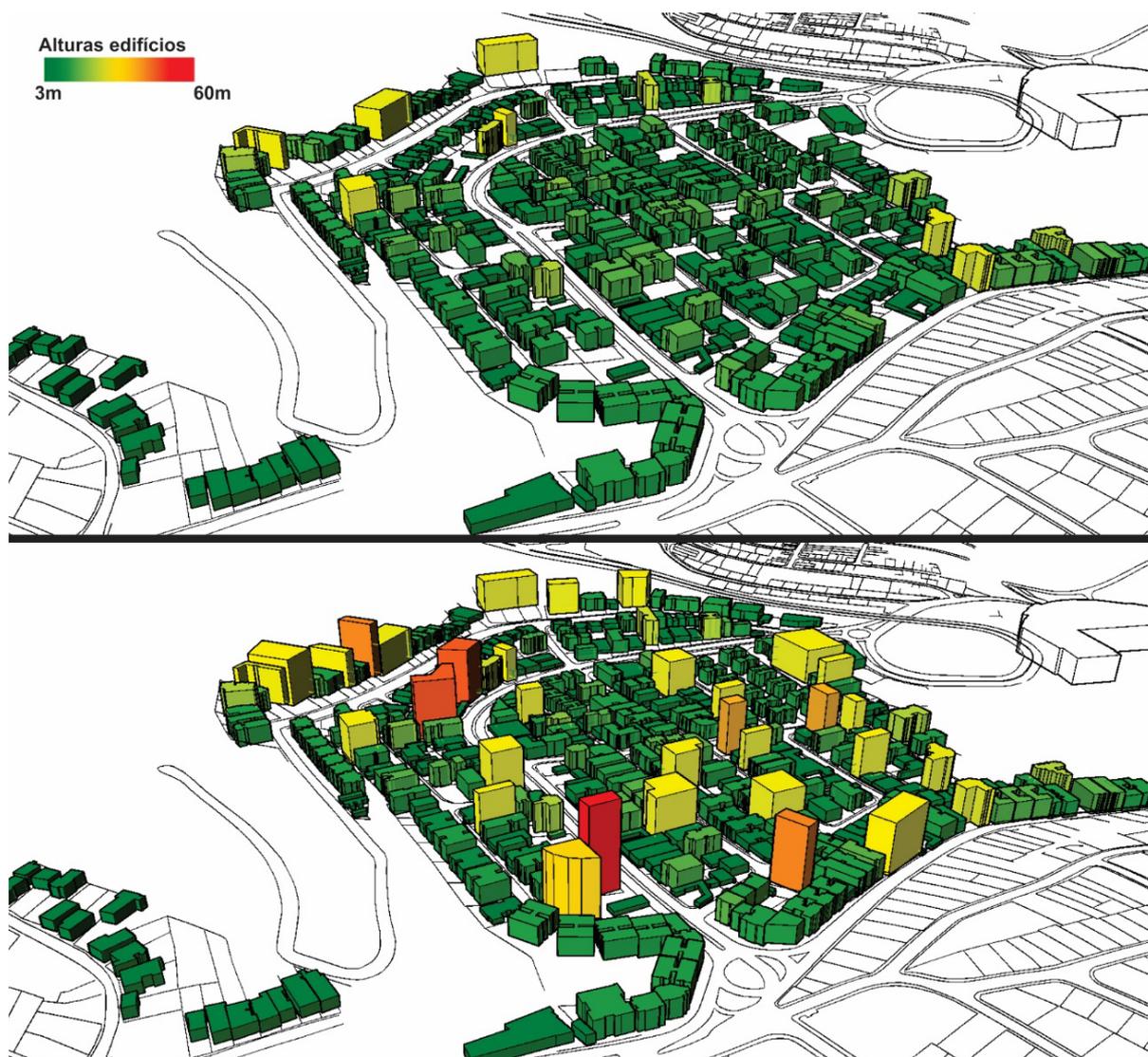


Figura 70. Estudo de alturas e de densidades após implementação de CityMetrics para avaliação de cenários. As ocupações propostas para o bairro proporcionam indicadores de densidade mais elevados e mais compatíveis com a lógica do DOT. Fonte: O autor.



Figura 71. Relação de Proximidade Física entre os edifícios do bairro e a estação (em azul), cuja localização foi indicada por meio de otimização. Neste ensaio preliminar, foram atribuídos pesos (área total construída) para cada lote no cálculo da média ponderada. Assim, buscou-se priorizar a proximidade para locais com potencial para abrigar (habitando ou trabalhando) mais pessoas. Fonte: O autor.

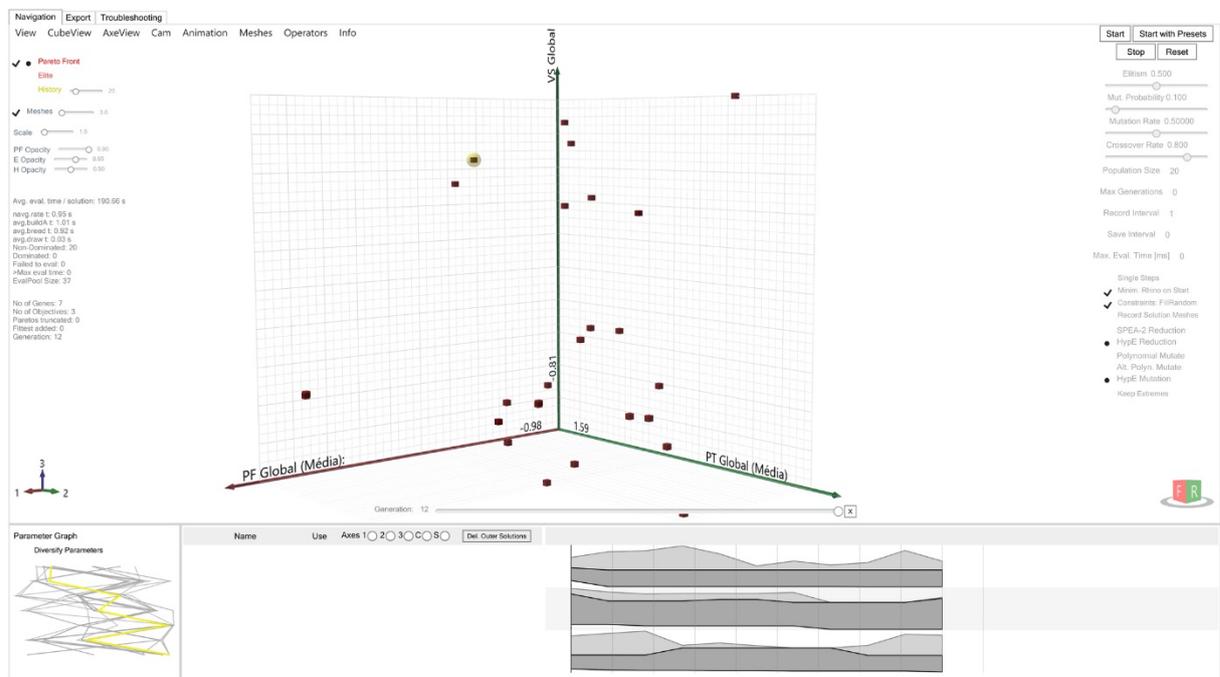


Figura 72. Interface do processo de otimização do posicionamento dos novos serviços. Diferentes eixos ilustrando as diferentes funções-objetivo adotadas e os pontos que representam as soluções de Pareto. Em amarelo, a solução adotada para desenvolvimento. Fonte: O autor.

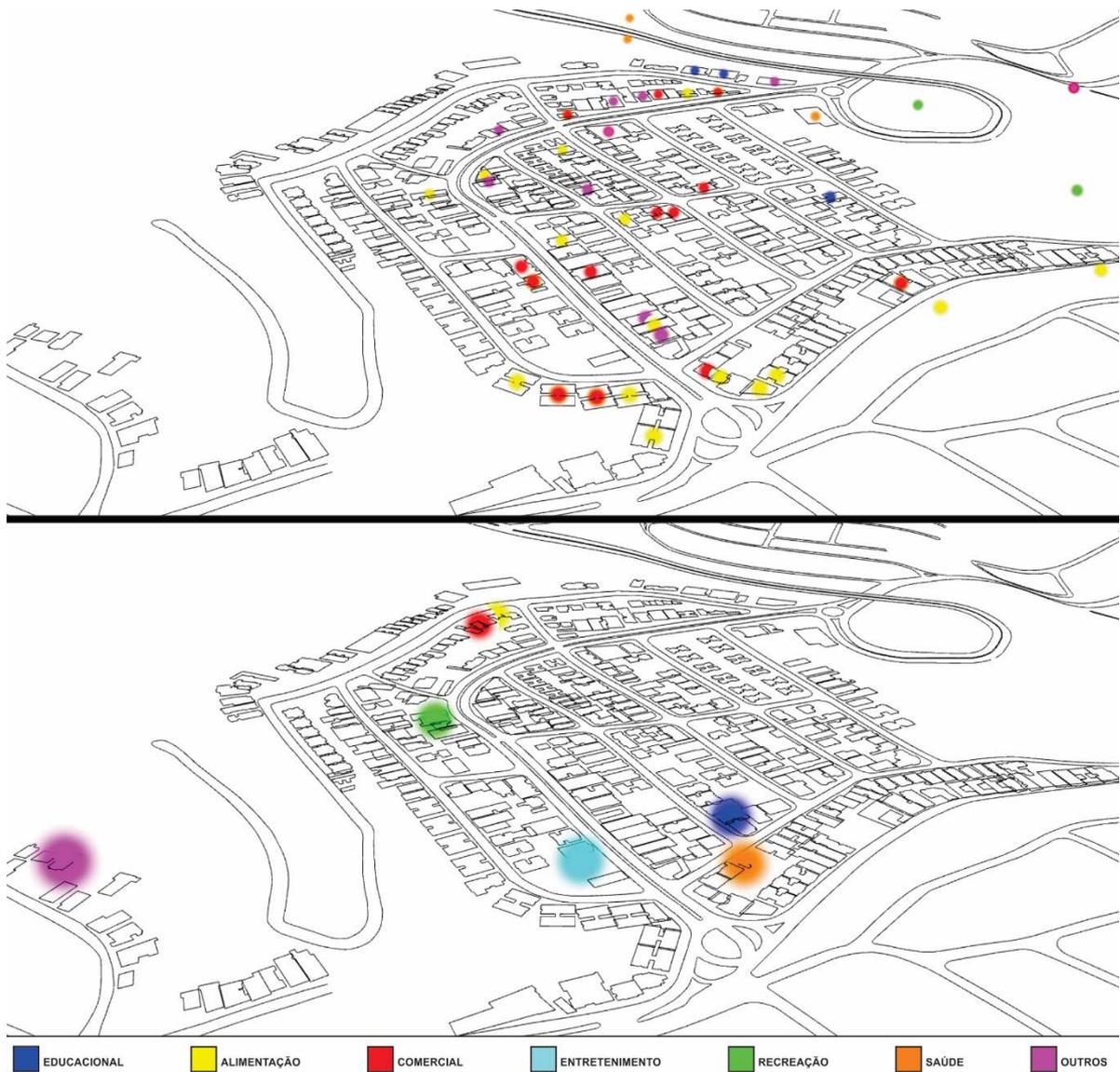


Figura 73. Localização dos serviços existentes no bairro (acima) e a localização proposta para inserção de novos serviços, após otimização (abaixo). Fonte: O autor.



Figura 74. Relação de Proximidade Física entre os edifícios e os serviços do bairro, antes (acima) e após otimização (abaixo) para inserção de novos serviços em cada categoria. Fonte: O autor.

#### 4.4.1. Resultados

O experimento referente ao ensaio preliminar 4, evidentemente, sugeriu algumas modificações na configuração do bairro, também no sentido de promover um melhor desempenho no âmbito dos princípios do DOT. Apesar de considerar novos índices, abordar uma estrutura diferente e de fornecer soluções distintas às obtidas no ensaio preliminar anterior, as configurações adotadas

neste experimento também sugerem melhorias no bairro, por meio de: a) uma excelente acessibilidade ao transporte, uma vez que a inserção otimizada da estação de transporte resultou em uma elevada pontuação média de PF para a estação – a utilização do cálculo da média ponderada permitiu ainda incrementar valores de PF de locais com maiores áreas construídas (ver Tabela 8); b) uma maior caminhabilidade, pois a inserção otimizada (considerando métricas físicas e topológicas) de novos serviços neste ensaio preliminar, proporcionou um aumento dos índices de PF, VS, RS e PT em todas as categorias analisadas, como mostrado na Tabela 8 e na Figura 75; c) um bairro com maior diversidade, uma vez que a proposição de novos edifícios e serviços, suportada por análises com CityMetrics resultaram em um índice de uso misto (MXI) mais equilibrado, sugerindo um maior equilíbrio entre áreas residenciais e não residenciais, considerando ainda, locais com maior integração para maiores ocupações – ver Tabela 8, e; d) uma densidade mais adequada para um bairro DOT, pois geometrias urbanas parametricamente controladas possibilitaram regular a densidade, de maneira a aumentar a ocupação do solo e a área construída total, suportando mais pessoas (habitando ou trabalhando) mais perto do nó de transporte, como também mostra a Tabela 8.

Tabela 8. Dados e resultados referentes ao ensaio preliminar 4. Os dados obtidos após a implementação de CityMetrics se encontram sublinhados.

<b>Informações Gerais (antes/<u>depois</u>)</b>			
<b>Área total do bairro</b>	42,48 ha	<u><b>42,48 ha</b></u>	
<b>Número total de quadras</b>	17	<u><b>17</b></u>	
<b>Número total de lotes</b>	426	<u><b>426</b></u>	
<b>Número total de edifícios</b>	397	<u><b>423</b></u>	
<b>Acessibilidade ao Transporte</b>			
<b>Distâncias entre os lotes e a estação</b>			
<b>Menor</b>	<b>Média</b>	<b>Média Ponderada</b>	<b>Maior</b>
<u><b>20m</b></u>	<u><b>335m</b></u>	<u><b>302m</b></u>	<u><b>1053m</b></u>
<b>Índices de Proximidade Física (IPF) p/ estação</b>			

Menor	Média		Média Ponderada		Maior	
<b>0,40</b>	<b>0,95</b>		<b>0,98</b>		<b>1</b>	
<b>Caminhabilidade (antes/depois)</b>						
<b>Índices de Proximidade Física (IPF) p/ serviços (Parciais)</b>						
Categoria	Menor		Média		Maior	
Educacional	0,73	<b>0,74</b>	0,97	<b>0,99</b>	1	<b>1</b>
Alimentação	0,68	<b>0,68</b>	0,98	<b>0,99</b>	1	<b>1</b>
Comércio	0,62	<b>0,60</b>	0,98	<b>0,98</b>	1	<b>1</b>
Entretenimento	0	<b>0,42</b>	0,53	<b>0,94</b>	0,96	<b>1</b>
Recreação	0,59	<b>0,75</b>	0,89	<b>0,98</b>	1	<b>1</b>
Saúde	0	<b>0,58</b>	0,80	<b>0,96</b>	1	<b>1</b>
Outros	0,56	<b>0,58</b>	0,97	<b>0,99</b>	1	<b>1</b>
<b>Índices de Proximidade Física (IPF) p/ serviços (Globais)</b>						
Menor		Média		Maior		
0,54	<b>0,72</b>	0,88	<b>0,98</b>	0,99	<b>1</b>	
<b>Índices de Variedade de Serviços (IVS) (Parciais)</b>						
Categoria	Menor		Média		Maior	
Educacional	0,36	<b>0,43</b>	0,59	<b>0,73</b>	0,76	<b>0,82</b>
Alimentação	0,39	<b>0,39</b>	0,88	<b>0,88</b>	0,97	<b>0,97</b>
Comércio	0,44	<b>0,44</b>	0,92	<b>0,91</b>	0,99	<b>0,99</b>
Entretenimento	0	<b>0,40</b>	0,53	<b>0,76</b>	0,96	<b>0,96</b>
Recreação	0,36	<b>0,56</b>	0,64	<b>0,73</b>	0,94	<b>0,94</b>
Saúde	0	<b>0,30</b>	0,42	<b>0,69</b>	0,79	<b>0,81</b>
Outros	0,26	<b>0,28</b>	0,91	<b>0,82</b>	1	<b>1</b>
<b>Índices de Variedade de Serviços (IVS) (Globais)</b>						
Menor		Média		Maior		
0,36	<b>0,46</b>	0,70	<b>0,79</b>	0,79	<b>0,86</b>	
<b>Índices de Recorrência de Serviços (IRS) (Parciais)</b>						
Categoria	Menor		Média		Maior	
Educacional	0,017	<b>0,019</b>	0,023	<b>0,026</b>	0,024	<b>0,026</b>
Alimentação	0,059	<b>0,061</b>	0,061	<b>0,064</b>	0,061	<b>0,064</b>
Comércio	0,043	<b>0,045</b>	0,043	<b>0,045</b>	0,043	<b>0,045</b>
Entretenimento	0,000	<b>0,002</b>	0,002	<b>0,005</b>	0,002	<b>0,005</b>
Recreação	0,007	<b>0,012</b>	0,012	<b>0,014</b>	0,012	<b>0,014</b>
Saúde	0,000	<b>0,007</b>	0,013	<b>0,016</b>	0,014	<b>0,017</b>
Outros	0,024	<b>0,026</b>	0,024	<b>0,026</b>	0,024	<b>0,026</b>
<b>Índices de Recorrência de Serviços (IRS) (Globais)</b>						
Menor		Média		Maior		
0,021	<b>0,025</b>	0,025	<b>0,028</b>	0,026	<b>0,028</b>	

Índices de Proximidade Topológica - Serviços (IPT) (Parciais)						
Categoria	Menor		Média		Maior	
Educacional	0	<u>0</u>	1,57	<u>1,43</u>	5	<u>5</u>
Alimentação	0	<u>0</u>	1,41	<u>1,08</u>	7	<u>5</u>
Comércio	0	<u>0</u>	1,68	<u>1,35</u>	7	<u>5</u>
Entretenimento	0	<u>0</u>	5,49	<u>2,35</u>	10	<u>7</u>
Recreação	0	<u>0</u>	2,51	<u>1,97</u>	8	<u>7</u>
Saúde	0	<u>0</u>	1,84	<u>1,51</u>	6	<u>6</u>
Outros	0	<u>0</u>	1,70	<u>1,41</u>	6	<u>6</u>
Índices de Proximidade Topológica - Serviços (IPT) (Globais)						
Menor		Média		Maior		
0,57	<u>0,29</u>	2,31	<u>1,59</u>	7	<u>5,89</u>	
Diversidade e Densidade (antes/depois)						
Uso Misto (MXI)	Residencial		Ñ-Residencial.			
	0,84	<u>0,58</u>	0,16	<u>0,42</u>		
Spacematrix						
FSI		GSI		N		
0,77	<u>1,12</u>	0,23	<u>0,26</u>	0,21	<u>0,21</u>	

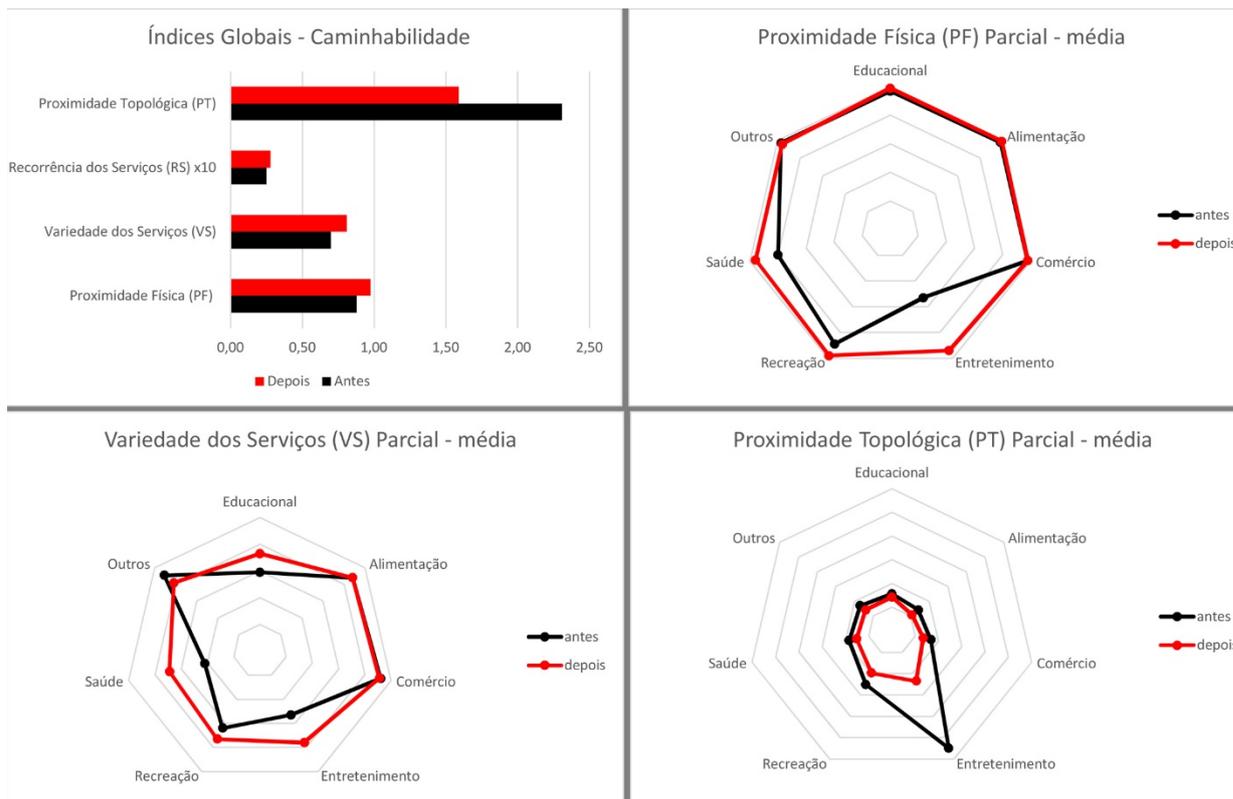


Figura 75. Gráficos ilustrando diferentes índices relacionados à caminhabilidade antes e após o experimento. Detalhe para os índices de Proximidade Topológica, que indicam melhor desempenho na medida em que diminuem, diferentemente dos índices relacionados à Proximidade Física. Fonte: O autor.

#### *4.5. Análise comparativa dos Ensaio preliminar*

Esta subseção traz comentários e comparações específicas sobre os ensaios preliminar realizados, de maneira a procurar uma maior compreensão acerca da utilização de CityMetrics em diferentes níveis. Estas comparações, articuladas de acordo com a sequência em que os experimentos foram elaborados e descritos, abordam e analisam os ensaios preliminar e suas assimetrias, apresentadas no princípio deste capítulo, que são: a) otimizações com uma única função objetivo x otimizações multi-objetivo – ensaios preliminar 1 e 2; b) implementação em áreas abstratas (ou ainda não ocupadas) x áreas existentes – ensaios preliminar 2 e 3, e; c) utilização de métricas físicas x utilização de métricas físicas e topológicas, simultaneamente – ensaios preliminar 3 e 4.

##### 4.5.1. Ensaio preliminar 1 x Ensaio preliminar 2

Os ensaios preliminar 1 e 2 correspondem à aplicação do sistema e de algumas das ferramentas propostas no contexto desta investigação de maneira muito semelhante, uma vez que utilizaram a mesma amostra (área abstrata para desenvolvimento dos estudos), a mesma estrutura e ordem de procedimentos. A diferença fundamental entre estas duas abordagens consistiu no método de otimização empregado: enquanto o ensaio preliminar 1 aplicou recursos de otimização considerando uma única função objetivo, o ensaio preliminar 2 utilizou otimização multicritério para indicação das soluções. Neste contexto, foi possível analisar e comparar as diferenças entre estes dois métodos, de maneira a permitir compreender potencialidades e fragilidades da aplicação de cada uma destas abordagens.

No ensaio preliminar 1, só havia a possibilidade de se otimizar um indicador de cada vez. Isso significa dizer que a procura por soluções nas tarefas de otimização era exclusivamente direcionada a priorizar um único aspecto, em um contexto mais restrito. Além disso, no caso específico da otimização da localização dos novos serviços, por exemplo, era preciso abordar cada categoria em um procedimento separado, o que implicou em: a) um número mais alto de etapas de otimização – dispendendo mais tempo na construção dos algoritmos, e; b) uma hierarquização das categorias, pois as escolhidas para serem otimizadas primeiro possuíam maior número de possibilidades de solução do que as últimas, restringindo o conjunto de soluções viáveis considerado a cada etapa.

No ensaio preliminar 2, foi possível abordar simultaneamente múltiplos critérios nas tarefas de otimização. Esta possibilidade significou uma modificação fundamental na maneira como os procedimentos de otimização foram organizados e, principalmente, na forma como as soluções foram obtidas. Sendo assim, por exemplo, foi possível verificar (como no ensaio preliminar anterior) qual a configuração de ruas, quadras e lotes forneceria a maior Proximidade Física para a estação e os serviços, considerando, no entanto (diferentemente do ensaio preliminar anterior), o arranjo que fornecesse o menor número de lotes e quadras com uma maior cobertura (Ground Space Index - GSI). Nesta situação, buscou-se uma solução que articulasse maior equilíbrio entre maiores índices relacionados à acessibilidade ao transporte e à caminhabilidade, e, simultaneamente, um melhor aproveitamento de infraestrutura.

Assim, a procura por soluções no ensaio preliminar 2 se deu visando a atender concomitantemente a mais de um índice e estabelecendo *trade-offs*<sup>59</sup> entre diferentes objetivos. Isso significou considerar um conjunto de soluções de Pareto, permitindo escolher dentre várias opções (tidas como igualmente apropriadas) quais objetivos e/ou critérios seriam priorizados. Ou seja, adotar a otimização multi-objetivo implicou em: a) um número menor de etapas de otimização – dispendendo menos tempo na construção dos algoritmos e, no entanto, mais tempo no processamento dos cálculos, que ficaram mais complexos, e; b) um universo de possibilidades de solução mais amplo para avaliação – o que é fundamental para a obtenção de soluções mais adequadas, de maneira a possibilitar atender objetivos conflitantes.

Neste contexto, a comparação entre os resultados obtidos nos estudos de caso 1 e 2 fornecem os seguintes dados: a) o ensaio preliminar 1 apresenta índices de Proximidade Física (PF) para a estação e para os serviços iguais ou ligeiramente melhores do que os do ensaio preliminar 2, entretanto; b) o ensaio preliminar 2 apresenta uma configuração com número consideravelmente menor de lotes e quadras, fornecendo maior área total, implicando em um maior potencial construtivo e um melhor aproveitamento de infraestrutura, sem comprometer os índices relacionados à acessibilidade ao transporte e caminhabilidade. A Figura 76 ilustra estes dados.

---

<sup>59</sup> Expressão da língua inglesa que descreve o equilíbrio entre duas características desejáveis, mas incompatíveis ou conflitantes.

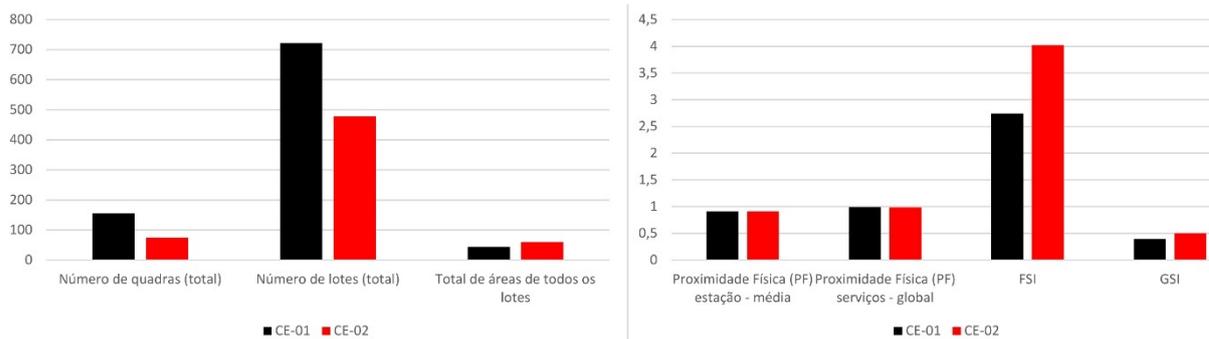


Figura 76. Gráficos ilustrando os resultados do ensaio preliminar 1 (em preto) e do ensaio preliminar 2 (em vermelho). O ensaio preliminar 2 apresenta uma configuração com número consideravelmente menor de lotes e quadras, fornecendo maior área, implicando em um maior potencial construtivo e um melhor aproveitamento de infraestrutura, sem comprometer os índices relacionados à acessibilidade ao transporte e caminhabilidade. A solução do ensaio preliminar 2 também apresenta maior cobertura (GSI) e intensidade (FSI). Fonte: o autor.

#### 4.5.2. Ensaio preliminar 2 x Ensaio preliminar 3

A comparação entre os ensaios preliminares 2 e 3 pretende apontar algumas das potencialidades e fragilidades da aplicação de CityMetrics em contextos mais ou menos restritivos, como na assimetria entre áreas abstratas e áreas já ocupadas. Pretende-se assim, avaliar a eficiência do sistema proposto nestes dois contextos distintos.

O ensaio preliminar 2 demonstra um cenário em que se pôde trabalhar com poucas restrições – não havia ruas definidas, quadras, lotes, edificações ou qualquer tipo de pré-existências ou condicionantes a serem consideradas (com a exceção dos limites da área para desenvolvimento). Assim, os índices de CityMetrics puderam ser diretamente associados a regras de geração dos componentes urbanos (ruas, quadras, lotes e edifícios) e às configurações para posicionamento de serviços. Neste sentido, é possível afirmar que a configuração do bairro proposto foi amplamente orientada pela procura por altos índices de Proximidade Física (PF) e pela avaliação dos índices de Uso Misto (AMXI) e dos indicadores de *Spacematrix*.

O ensaio preliminar 3 apresenta um contexto bem mais restritivo no que diz respeito a alterações nas geometrias urbanas. A amostra selecionada para implementação do sistema (um bairro existente e consolidado) já possuía ruas, quadras, lotes e edificações estabelecidos. Sendo assim, os índices de CityMetrics foram empregados para avaliar o desempenho das configurações urbanas existentes e tarefas de otimização foram utilizadas para propor modificações (inserção de estação, de novos serviços e diferentes configurações para edifícios em lotes vagos) que incrementassem aspectos relacionados à acessibilidade ao transporte, à caminhabilidade, à diversidade e à densidade. Utilizou-se também, no ensaio preliminar 3, mais índices para avaliação e otimização das configurações urbanas do que no ensaio preliminar 2 (Variedade de Serviços - VS e Recorrência de Serviços - RS). Foi possível ainda, avaliar a utilização de CityMetrics em locais com topografia acidentada, considerando aclives e declives nos cálculos de PF, VS e RS.

Apesar de representarem contextos distintos, ambos os estudos de caso resultaram em soluções que apontam elevado desempenho para suas áreas de análise - sob o ponto de vista dos índices propostos. O ensaio preliminar 2 resultou na geração (ainda que preliminar) de uma área amplamente orientada pelos índices empregados, enquanto o ensaio preliminar 3 promoveu a indicação de uma série de modificações que sugerem um incremento significativo do desempenho da área avaliada, conforme ilustra a Figura 77.

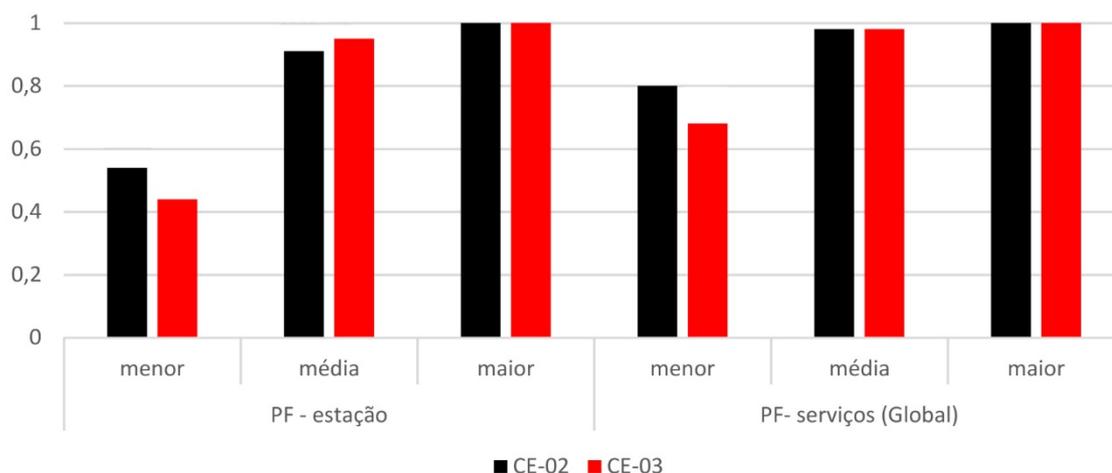


Figura 77. Gráfico ilustrando a comparação de resultados entre o ensaio preliminar 2 (em preto) e o ensaio preliminar 3 (em vermelho). Elevados índices de Proximidade Física relacionados à acessibilidade ao transporte e à caminhabilidade em ambas situações. Fonte: O autor.

#### 4.5.3. Ensaio preliminar 3 x Ensaio preliminar 4

Os ensaios preliminares 3 e 4 consistem na implementação de CityMetrics em uma mesma área urbana existente. A diferença entre as duas abordagens, conforme mencionado, é que, enquanto o ensaio preliminar 3 considerou apenas métricas físicas, no ensaio preliminar 4 foram empregadas métricas físicas e topológicas para análise e otimização de configurações urbanas. Essa modificação permitiu alguns rearranjos na estrutura metodológica do ensaio preliminar 4, que considerou ainda cálculos de média ponderada para a obtenção de soluções.

Assim, no ensaio preliminar 3, percebe-se as seguintes características: a) a regulação paramétrica dos edifícios para os lotes vagos se deu em uma relação direta e uniforme – todos os edifícios propostos possuíam o mesmo número de andares; b) as soluções obtidas se basearam especificamente em aspectos relacionados à métrica física, como PF, VS e RS para o posicionamento da estação e dos novos serviços, e; c) as funções-objetivo adotadas se referiram

às médias simples dos índices de todos os terrenos, o que não permite considerar diferentes pesos para lotes de acordo com suas características.

No ensaio preliminar 4, pode-se destacar os seguintes aspectos: a) a introdução do algoritmo de Proximidade Topológica (PT) permitiu calcular a integração de cada lote disponível, o que significou estabelecer diferentes alturas para os edifícios propostos, de maneira que se ocupasse mais em áreas com integração mais alta – ou seja, maior ocupação em áreas de maior recorrência de pedestres; b) procurou-se por soluções que estabelecessem *trade-offs* entre métricas físicas e topológicas, o que permitiu considerar mais índices e diferentes critérios para o posicionamento da estação e dos novos serviços – PF, VS, RS e PT, e; c) as funções-objetivo adotadas se referiram às médias ponderadas dos índices de todos os terrenos, o que permitiu considerar diferentes pesos para lotes, de acordo com sua área total construída – priorizando o posicionamento da estação (ou dos serviços) em áreas com potencial para abrigar (residindo ou trabalhando) maior número de pessoas.

Sendo assim, a comparação entre os resultados obtidos nos estudos de caso 3 e 4 fornecem os seguintes dados: a) o ensaio preliminar 3 apresenta índices de Proximidade Física (PF) para a estação e para os serviços iguais ou ligeiramente melhores do que os do ensaio preliminar 4, entretanto; b) o ensaio preliminar 4 apresenta uma configuração que contempla também aspectos relacionados à métrica topológica<sup>60</sup>, o que se reflete em índices de PT melhores (no

---

<sup>60</sup> O índice de Proximidade Topológica (PT), baseado na teoria da Sintaxe Espacial de Hillier & Hanson (1984), visa a expressar o número de passos topológicos (ou mudanças de direção) necessários para se alcançar um determinado destino. Ou seja, quanto menores forem os índices de PT, menos espaços (ou ruas, em determinadas situações) são necessários percorrer para se chegar a uma determinada localidade. Sendo assim, a PT possui grande utilidade enquanto métrica complementar à Proximidade Física, conforme afirmado nos Capítulos 1 e 3.

caso da proximidade topológica, quanto menor o índice, menor a distância) que o do ensaio preliminar 3, com índices similares de PF e VS. Além disso, a utilização da média ponderada dos índices implicou em soluções mais direcionadas às áreas com maior ocupação e integração.

A Figura 78 ilustra comparações entre os resultados obtidos nos ensaios preliminares 3 e 4.

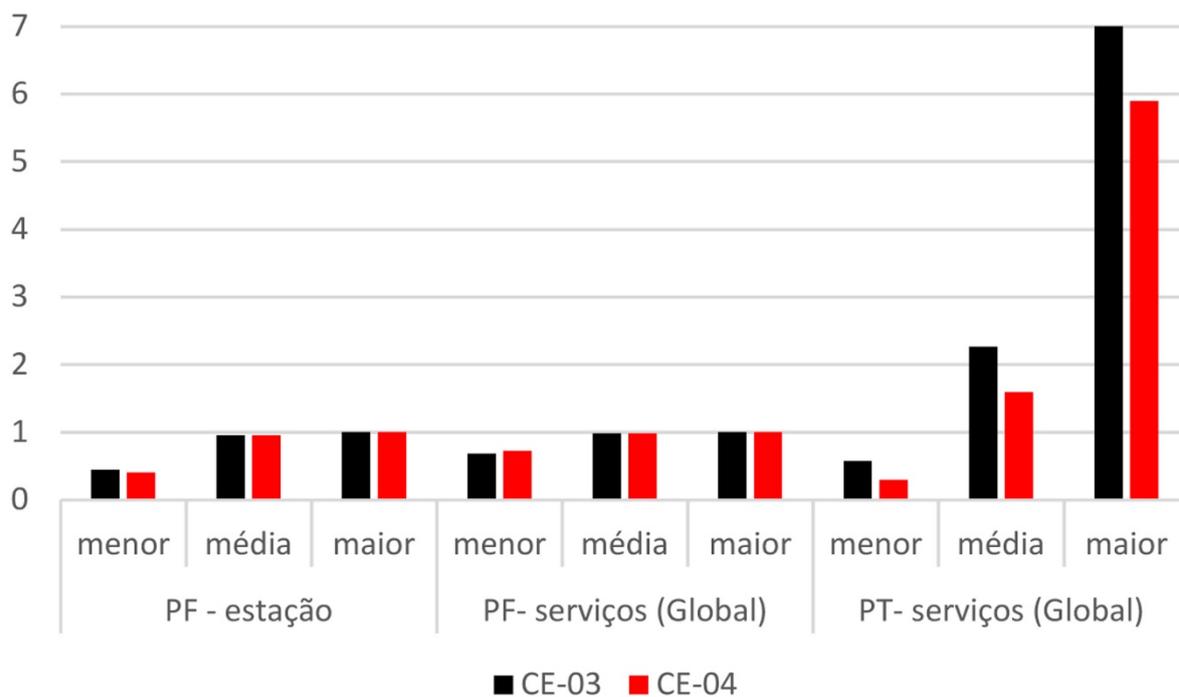


Figura 78. Gráfico ilustrando a comparação de resultados entre o ensaio preliminar 3 (em preto) e o ensaio preliminar 4 (em vermelho). Elevados índices de Proximidade Física relacionados à acessibilidade ao transporte e à caminhabilidade em ambas situações. Índices de Proximidade Topológica significativamente melhores (mais baixos) no ensaio preliminar 4. Fonte: O autor.

#### *4.6. Reflexões sobre os Ensaios preliminares*

Este capítulo descreve diferentes ensaios preliminares em que se utilizou CityMetrics para otimizar configurações urbanas em diferentes contextos e por meio de diferentes métricas. Foram ainda elaboradas análises comparativas que se estruturam por meio de três assimetrias existentes entre os ensaios preliminares, que apresentam crescente número de variáveis e complexidade. Portanto, parte-se de uma prova de conceito - com um menor número de restrições (ensaio preliminar 1) e chega-se a uma implementação em área urbana já existente e consolidada, com várias condicionantes e na qual são empregadas diferentes métricas e ferramentas (ensaio preliminar 4). O sistema proposto foi adaptado para implementação em diferentes contextos, por meio de abordagens que se mostraram eficientes em diferentes cenários. Entretanto, é importante ressaltar que não se pretende aqui encerrar o universo de possibilidades de utilização de CityMetrics, de maneira que se acredita que o sistema desenvolvido permita auxiliar em abordagens tão diversificadas quanto forem as questões a que se tentar resolver com CityMetrics.



“The fundamental idea behind usability testing is that the interface creator is not the user. We can broaden the idea of an interface to encompass more than websites and software”

**Jeff Sauro**

Este capítulo apresenta uma breve descrição de testes de usabilidade concebidos para avaliar a funcionalidade de CityMetrics, que decorreram no âmbito de dois *workshops* realizados, a saber: a) no contexto do XX Congresso da Sociedade Ibero-americana de Gráfica Digital (SIGraDi), em Buenos Aires, Argentina, entre os dias 7 e 8 de novembro de 2016, na *Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo* da Universidade de Buenos Aires, e; b) no contexto de atividades de investigação do grupo de pesquisa *Design and Computation Group* (DCG), da Faculdade de Arquitetura da Universidade de Lisboa, Portugal, no dia 15 de novembro de 2016.

### 5.1. Objetivos

O principal objetivo da série de *workshops* intitulados *(Para)metric approaches for optimization tasks in sustainable urban planning* foi o de recolher dados decorrentes da utilização de CityMetrics em um contexto real, de maneira a fornecer subsídios mais concretos para uma melhor compreensão acerca dos diversos níveis de funcionalidade do sistema (e do conjunto de ferramentas) elaborados. Para isso, foi importante submeter CityMetrics à utilização e avaliação de estudantes, professores, profissionais e pesquisadores de diferentes países, níveis de formação acadêmica e experiência profissional.

De maneira mais específica, os workshops realizados objetivaram a aplicação de CityMetrics em tarefas simplificadas de planejamento relacionadas ao escopo dos princípios mensuráveis do DOT, a fim de verificar as potencialidades e as fragilidades decorrentes do uso de CityMetrics por usuários diversificados, que tiveram a oportunidade de avaliar, sumariamente, o sistema e as ferramentas em questão.

## 5.2. Participantes dos workshops

Os *workshops* contaram com, ao todo, 11 participantes<sup>61</sup> de três países (Argentina, Brasil e Portugal), provenientes de seis diferentes instituições de ensino (Universidade de Buenos Aires – Argentina, Universidade Federal do Cariri – Brasil, Universidade São Judas Tadeu – Brasil, Instituto Superior Técnico – Portugal, Instituto Universitário de Lisboa / ISCTE – Portugal e Universidade de Lisboa – Portugal), com diversos níveis de formação acadêmica (graduandos, mestres, doutorandos e doutor) em Arquitetura, Urbanismo e Planejamento Urbano (ver Figura 79). Estes dados, conjuntamente ao fato dos participantes estarem inseridos no contexto do SIGraDi e do DCG, permitem identificar um público relativamente diversificado e, ao mesmo tempo, particularmente interessado em questões inerentes ao universo dos recursos computacionais aplicados à Arquitetura e ao Urbanismo.

---

<sup>61</sup> Apesar de o número de participantes não ter sido grande - foram 11 ao todo, com apenas nove respondendo ao questionário, eles permitiram uma observação *in loco* e um acompanhamento mais individualizado das atividades, possibilitando obter diferentes percepções, dúvidas e sugestões dos usuários acerca da utilização do sistema e das ferramentas propostas. No entanto, considerando o propósito, a escala desta investigação e o sistema adotado para a execução dos testes de usabilidade de CityMetrics (*moderated in-person*), a quantidade de participantes dos workshops atende (e supera) o número apontado como satisfatório de cinco amostras (VIRZI, 1992). Além disso, Virzi (1992) coloca que os primeiros 4-5 usuários encontram 80% dos problemas em um teste de usabilidade e que os problemas graves são mais prováveis de ser detectados pelos primeiros usuários. Instrumentos, ferramentas e/ou interfaces podem ter suas usabilidades testadas de maneira mais ampla por meio da internet (testes de moderação remota), mas considerando a natureza das atividades em que CityMetrics se aplica e as informações e a contextualização necessárias para uma correta avaliação, o teste de moderação presencial pareceu a melhor opção para uma avaliação apropriada do sistema e das ferramentas elaboradas.

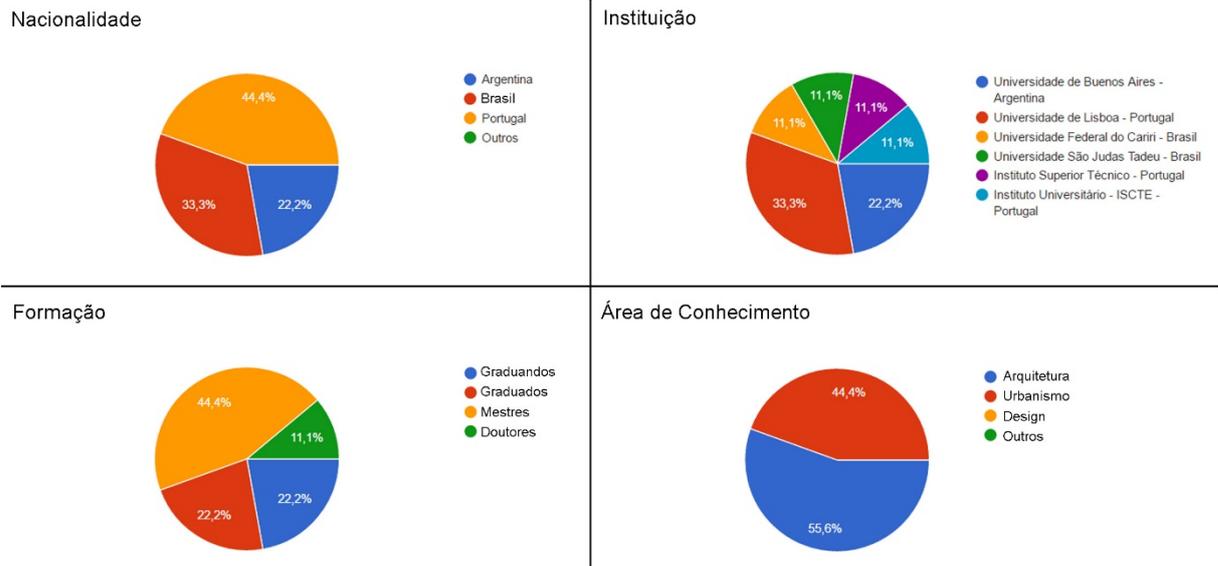


Figura 79. Dados sobre os participantes dos *workshops*. Fonte: O autor.



Figura 80. Registros dos *workshops* realizados. Fonte: O autor.

### 5.3. Estruturação e sequência das etapas dos workshops

A participação no *workshop* requereu a instalação prévia dos *software* Rhinoceros e Grasshopper nos computadores dos participantes, o que foi crucial para o sucesso das atividades propostas, uma vez que evitou problemas relacionados à instalação ou incompatibilidades de versões destes programas. Ao início das atividades foram disponibilizadas algumas atualizações e realizadas rápidas instalações de *add-ons* necessários para o funcionamento pleno do conjunto de ferramentas de CityMetrics.

Em sequência, os participantes foram inseridos no contexto desta investigação, por meio de uma apresentação na qual foram expostos: a) o problema desta investigação, sua contextualização, recorte e objetivos; b) os conceitos e definições sobre o Desenvolvimento Orientado pelo Transporte e seus princípios; c) a lógica e os recursos computacionais a serem utilizados nas atividades pretendidas, e, mais especificamente; d) o sistema e o conjunto de ferramentas propostos no contexto de CityMetrics, seus objetivos, funcionamento e possibilidades de aplicação.

Posteriormente, os participantes foram apresentados à área urbana de estudo proposta para o *workshop*: o bairro Cascatinha<sup>62</sup>, em Juiz de Fora, no estado brasileiro de Minas Gerais. Esta área foi descrita com uma relevante amostra para análise e implementação do sistema e do conjunto de ferramentas propostos, não só devido à sua proximidade ao centro da cidade, mas também porque possui uma extensão adequada para implementação do DOT, densidade

---

<sup>62</sup> Esta mesma área foi utilizada nos ensaios preliminares 3 e 4, apresentados no Capítulo 4.

relativamente baixa, nenhuma estação de transporte, certa complexidade topográfica, considerável quantidade de áreas disponíveis para novas construções e uma boa inserção na rede urbana, ligando diretamente o centro da cidade com outras regiões do município. Estes aspectos foram apontados como importantes para uma adequada avaliação da funcionalidade de CityMetrics.

A partir daí, os participantes foram organizados em pequenos grupos de trabalho, que receberam arquivos com as seguintes informações sobre o modelo de análise<sup>63</sup>: a) os desenhos, número de pavimentos, usos e posicionamento topográfico de cada edificação existente, a fim de permitir calcular distâncias, trajetos, possíveis caminhos de conexão e aferir índices de diversidade e indicadores de densidade; b) a localização dos serviços do bairro, com o objetivo de permitir medir, respectivamente, a proximidade, a variedade e a recorrência dos serviços da área de análise; c) as áreas disponíveis para novas construções (lotes vagos e construções não consolidadas), visando a proporcionar espaço para a proposição de novas construções, de maneira a possibilitar a visualização de diferentes cenários de ocupação; d) o desenho topográfico das ruas do bairro, com vistas a considerar trajetos, distâncias e inclinações, e; e) o desenho de ruas quadras e lotes, de modo a proporcionar avaliações de densidade e diversidade (ver Figura 81).

---

<sup>63</sup> Para efeito dos *workshops* realizados, alguns dados referentes à área urbana analisada foram simplificados. No intuito de compatibilizar as atividades propostas com o tempo disponível para sua execução, a quantidade de serviços urbanos e suas categorias foram reduzidas, demandando assim menos tempo de cálculo e mais tempo para discussão sobre as tarefas a serem executadas e os resultados obtidos.

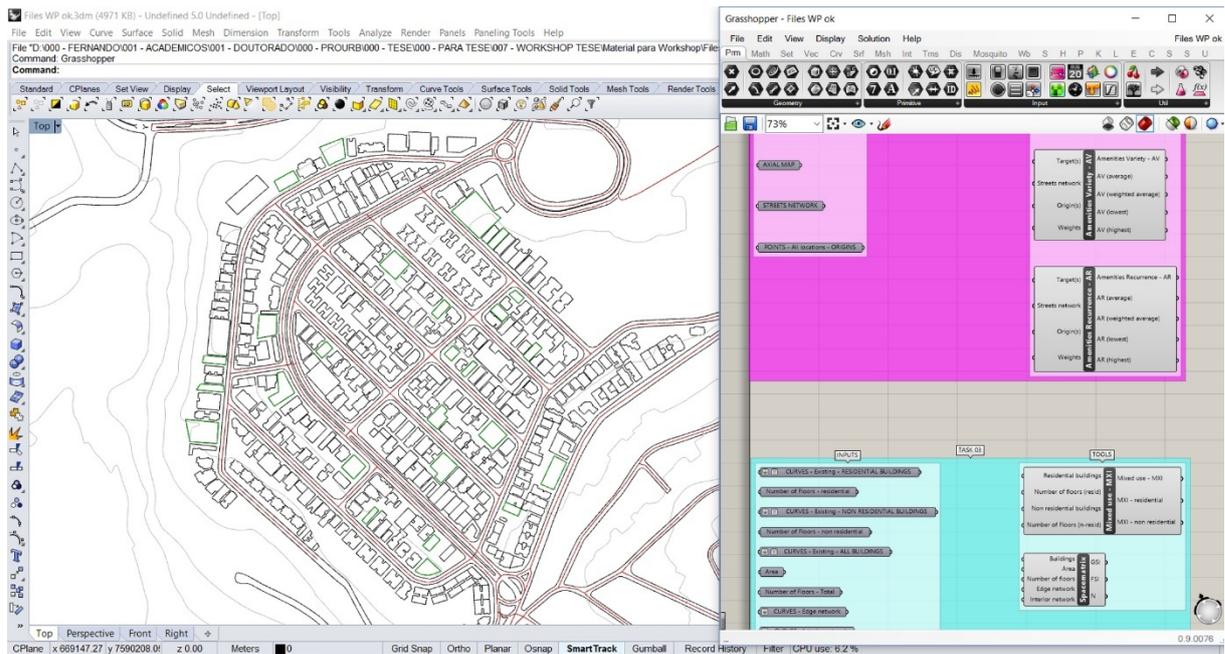


Figura 81. Visualização de parte dos arquivos disponibilizados para os participantes do *workshop*. Houve ainda uma discussão inicial sobre o bairro em si e sobre as percepções dos participantes sobre possíveis soluções para as tarefas a serem executadas. Fonte: O autor.

Cada grupo de trabalho organizado se responsabilizou pela realização de uma das três atividades propostas no *workshop*, a saber: a) indicar o local mais apropriado para inserção de uma estação de transporte no bairro de análise, justificando sua proposta por meio de tarefas de otimização que considerem o Algoritmo de Proximidade Física (APF) e/ou o Algoritmo de Proximidade Topológica (APT); b) apontar o local mais apropriado para inserção de um novo serviço urbano, considerando uma das categorias disponíveis e justificando sua proposta por meio de tarefas de otimização que considerem o Algoritmo de Proximidade Física, o Algoritmo de Variedade de Serviços (AVS) e o Algoritmo de Recorrência de Serviços (ARS), e; c) propor um novo cenário de ocupação para os lotes vagos do bairro, justificando sua proposta por meio do Algoritmo de Uso Misto e do Algoritmo de Indicadores *Spacematrix*.

Foi determinado um período para que os grupos desenvolvessem suas respectivas tarefas, ao final do qual todos os participantes foram reunidos novamente e tiveram a oportunidade de apresentar e discutir seus resultados. Em sequência, teve início a etapa final das atividades, que consistiu na aplicação de um conjunto de avaliações individuais do sistema e das ferramentas utilizadas.

#### 5.4. Metodologia para avaliação de CityMetrics

O procedimento adotado para avaliação de CityMetrics foi o teste de usabilidade, um método comumente empregado para medir a experiência de usuários de uma determinada ferramenta ou produto, após sua utilização (SAURO, 2016). Os testes de usabilidade devem ser realizados com usuários representativos do público-alvo a que se destina uma determinada ferramenta, de maneira a procurar detectar problemas de utilização e, ao mesmo tempo, gerar medidas de avaliação de desempenho (SAURO, 2016). Esta metodologia permite realizar avaliações eficientes de maneira relativamente simples.

Sauro (2016) identifica ainda que os resultados de um teste de usabilidade podem ser coletados por meio de um *Single Ease Question* (SEQ), ou questionário de perguntas simples, um inquérito a ser aplicado logo após a utilização do produto e que considera uma escala de 7 pontos para mensurar a dificuldade encontrada para realizar uma determinada tarefa (ver Figura 82).

Quão difícil ou fácil foi, pra você, utilizar as ferramentas? \*

	1	2	3	4	5	6	7	
Extremamente difícil	<input type="radio"/>	Extremamente fácil						

Figura 82. Exemplo de questionário SEQ utilizado. Fonte: O autor.

Neste sentido, o teste de usabilidade de CityMetrics se desenvolveu por meio da observação direta dos usuários em laboratório (*moderated in-person*) – o que permitiu obter diretamente informações de diversos níveis sobre a utilização do sistema - e da adaptação de SEQs que,

aplicados logo após a utilização das ferramentas, objetivaram levantar a opinião dos participantes sobre CityMetrics, com relação aos seguintes aspectos, de maneira geral e específica<sup>64</sup>: a) quanto à facilidade de utilização; b) quanto à utilidade; c) quanto ao desempenho; d) quanto ao atendimento aos objetivos pré-estabelecidos, e; e) quanto à possibilidade de utilizar novamente as ferramentas e o sistema propostos.

---

<sup>64</sup> Os questionários foram desenvolvidos de maneira a abordar o sistema e as ferramentas de maneira geral – considerando o conjunto de funcionalidades como um todo – e específica, onde os participantes do *workshop* avaliaram as ferramentas isoladamente.

### 5.5. Resultados

Considerando que a maioria dos participantes possuía experiência prévia com o *software* Rhinoceros e o *plugin* Grasshopper, pode concluir-se que a experiência com CityMetrics não apresentou maiores obstáculos. De uma maneira geral, os utilizadores realizaram as tarefas recomendadas sem grandes dificuldades aparentes. Não houve paradas significativas nos procedimentos desempenhados, para resolver eventuais problemas com a manipulação das ferramentas ou até mesmo com o entendimento dos experimentos.

Com relação à avaliação das ferramentas por parte dos utilizadores, os dados obtidos com os SEQs dos testes de usabilidade permitem as seguintes inferências (ver Figura 83):

- a) A facilidade de utilização do conjunto de ferramentas como um todo foi avaliada com média 5.22 (em um máximo de 7), indicando que os utilizadores classificaram as ferramentas como de manuseio fácil;
- b) A utilidade do conjunto de ferramentas como um todo foi avaliada com média 6.44, indicando que os utilizadores classificaram CityMetrics como extremamente útil;
- c) O desempenho do conjunto de ferramentas como um todo foi avaliado com média 5.33, indicando que os utilizadores classificaram a performance das ferramentas como rápida;
- d) Com relação ao atendimento das ferramentas como um todo a seus objetivos, a avaliação foi de 6.67, indicando que os utilizadores entenderam que CityMetrics atendeu plenamente a seus objetivos;

- e) Quando solicitados a informar, em uma escala de 1 a 7, se consideram a possibilidade de utilizar as ferramentas de CityMetrics novamente, a média das respostas foi de 6.67, indicando uma elevada satisfação dos utilizadores com CityMetrics e uma elevada potencialidade do sistema e das ferramentas de serem implementadas futuramente.

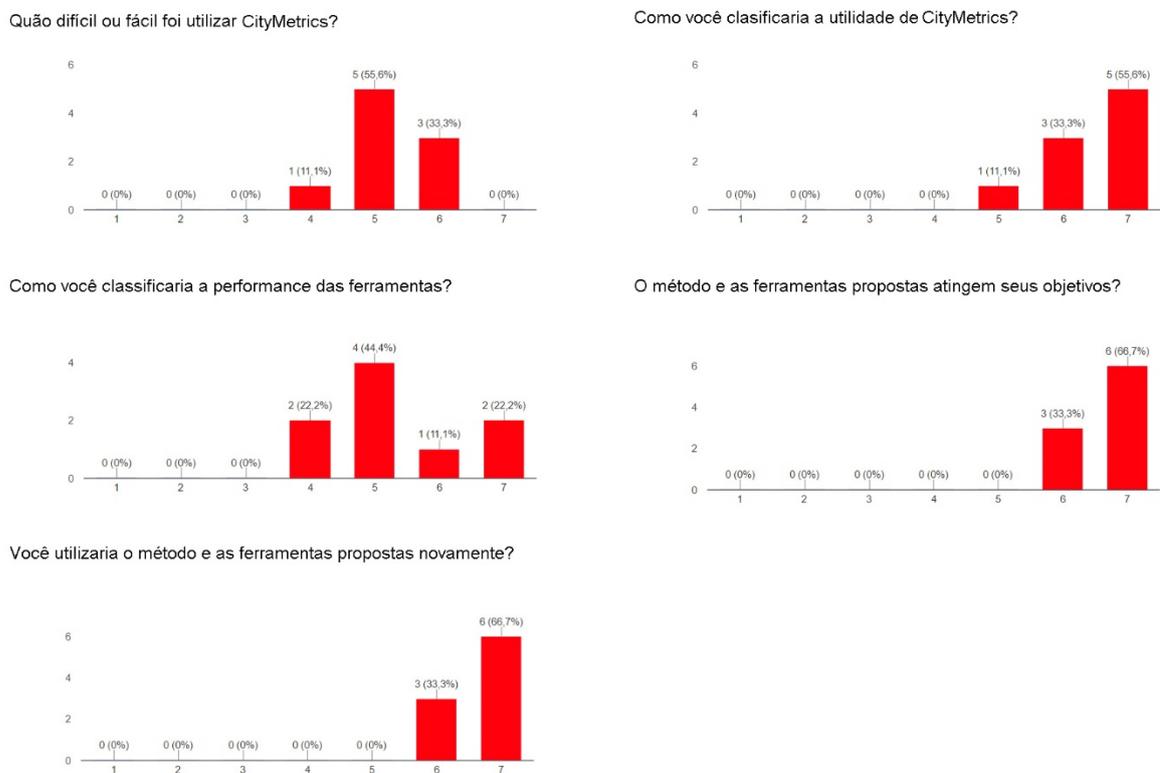


Figura 83. Gráficos ilustrando os resultados dos SEQs do teste de usabilidade. Fonte: O autor.

### 5.6. Reflexões sobre as avaliações

Conforme mencionado, o sistema e o conjunto de ferramentas CityMetrics foram apresentados em dois *workshops* - intitulados *(Para)metric approaches for optimization tasks in sustainable urban planning*, realizados no âmbito do XX Congresso da Sociedade Ibero-americana de Gráfica Digital (SIGraDi), em Buenos Aires, Argentina e no contexto de atividades de investigação do grupo de pesquisa Design and Computation Group (DCG), da Faculdade de Arquitetura de Lisboa/Portugal. O objetivo principal foi coletar e analisar dados decorrentes da utilização de CityMetrics em um contexto de trabalho real.

Neste cenário, o sistema e as ferramentas de CityMetrics foram avaliados por utilizadores de diferentes países, instituições e níveis de formação acadêmica, por meio da metodologia de testes de usabilidade com moderação presencial e a aplicação de *Single Ease Question* (SEQ) ou questionários de perguntas simples.

As ferramentas propostas foram avaliadas como boas ou muito boas sob os aspectos de sua facilidade de uso, utilidade e atendimento aos seus objetivos. A performance das ferramentas foi avaliada como rápida e a maioria dos participantes afirmou que utilizaria as ferramentas novamente, o que é um excelente indicador da utilidade e da potencialidade de CityMetrics.

Entretanto, ainda há espaço para o aperfeiçoamento de algumas das funcionalidades de CityMetrics, bem como para a elaboração destas ferramentas (e de outras que possam ser desenvolvidas posteriormente) sob a forma de *plugins* independentes, dispensando assim a necessidade de instalação de outros *add-ons* para seu funcionamento.

CONCLUSÃO E CONTRIBUIÇÕES

“I don’t believe that everybody needs to be a programmer or everybody needs to be an engineer, but I think people should have enough of an understanding of how software operates that they can get outside of the constraints imposed by software written for them”

**Casey Reas**

### *Conclusão e contribuições*

Esta tese aborda a associação entre métricas de avaliação de desempenho e recursos algorítmico-paramétricos no suporte à tomada de decisão em processos de projeto urbano, por meio da elaboração de um sistema – CityMetrics - para análise e otimização de performance de configurações urbanas. Este sistema pode ser continuamente alterado, é suportado por uma série de estratégias computacionais e preconiza a utilização de um conjunto de ferramentas algorítmico-paramétricas que implementam referências de cálculo de desempenho enquanto métricas de avaliação do grau de eficiência e das possibilidades de operação de bairros e cidades.

Sendo assim, CityMetrics visa a contribuir na direção de uma nova forma de projetar os espaços urbanos. À medida que o sistema elaborado proporciona a implementação de novas estratégias, instrumentos e procedimentos ao processo de projeto, ele pode ser considerado como o introdutor de uma transformação importante nos métodos tradicionais de projeto e planejamento urbano.

Esta transformação se materializa, principalmente, por meio da capacidade que CityMetrics possui de definir e simular parametricamente os componentes formais e espaciais constituintes de um bairro ou de uma cidade – o que pode significar a possibilidade de novas maneiras de se abordar diversos problemas urbanos.

Nesta lógica, é possível associar referências de cálculo relativas ao desempenho de configurações formais urbanas a recursos algorítmico-paramétricos, potencializando a implementação de operações computacionais em abordagens que demandem um processamento dinâmico e eficiente da grande quantidade de dados envolvida em processos de projeto urbano, de maneira

a incorporar um conjunto de variáveis e dar visibilidade formal-espacial a elas em tempo real (ou em tempo suficiente para funcionar como retroalimentação no processo de projeto, seja por projetistas, seja por outros atores envolvidos).

Assim, o sistema elaborado visa a atuar como um instrumento computacional de suporte à tomada de decisão no processo de projetos urbanos, mais especificamente, por meio de tarefas de análise e otimização de configurações geométricas e algébricas de um determinado espaço urbano, por meio da implementação algorítmico-paramétrica de atributos objetivamente mensuráveis e sua associação ao processo tradicional de projeto. Isto é, CityMetrics não é intencionado para configurar, por si só, um novo método para o projeto urbano, mas para ser incorporado a processos convencionais de projeto, modificando-os e potencializando-os, de maneira a permitir aos projetistas (ou aos diversos atores envolvidos no processo) associar à natureza fundamentalmente objetiva do sistema elaborado, aspectos subjetivos, não programáveis e/ou intangíveis ao computador. Um exemplo desta potencialidade é o fato de questões subjetivas poderem ser utilizadas para se escolher entre as várias soluções igualmente ótimas de uma fronteira de Pareto<sup>65</sup>.

Além disso, considerando que, essencialmente, CityMetrics se baseia na implementação computacional de atributos objetivamente mensuráveis enquanto métricas de avaliação de desempenho, pode-se afirmar que o sistema proposto possui potencialidade para apoiar projetos urbanos de outras naturezas e propósitos (e que extrapolem o escopo do DOT) adaptando ou incluindo outros atributos mensuráveis para análise e otimização de desempenho. Isto significa

---

<sup>65</sup> Conforme exposto nos Capítulos 2, 3 e 4.

dizer que: a) em um nível mais específico - a utilização de CityMetrics pode ser aplicada, por extensão, a demais demandas de projeto urbano que considerem aspectos relacionados às métricas abordadas nesta investigação, e; b) em um nível mais geral – o sistema proposto pode ser adaptado para abordar diferentes níveis de desempenho objetivamente mensuráveis (e. g. térmico, acústico, aerodinâmico) – o que demandaria a pesquisa por novas métricas e o desenvolvimento de novas ferramentas (ou a adaptação das existentes).

Neste cenário, e em síntese, esta tese apresenta diversas contribuições científicas, entre elas está a elaboração de um sistema computacional de suporte ao processo de projeto urbano, que propõe a associação de métricas de avaliação de desempenho a recursos algorítmico-paramétricos, visando à análise e à otimização de configurações geométricas e algébricas de espaços urbanos. Este sistema se sustenta na possibilidade de desenvolver e combinar ferramentas customizadas, bem como de incorporar outras já existentes para apoiar decisões em questões urbanas de diferentes naturezas, modificando e potencializando o método tradicional de projeto urbano.

CityMetrics se fundamenta por meio da articulação de uma série de estratégias computacionais e pelo desenvolvimento e combinação de um conjunto de ferramentas algorítmicas para suporte a tarefas de análise e proposição em contexto urbanístico, que podem ser adaptadas a diferentes propósitos e aplicam métricas relativas a: distâncias físicas e topológicas; índices referentes à variedade, à recorrência e à distribuição de serviços essenciais em uma área urbana; indicadores de diversidade e de densidade. Estas ferramentas são implementadas em Sistemas Generativos, desenvolvidas em Linguagem de Programação Visual e podem utilizar diferentes recursos de otimização para suportar à tomada de decisão.

As ferramentas elaboradas estão disponibilizadas para utilização por meio de download no site:

[http://www.ufjf.br/fernando\\_tadeu/citymetrics/](http://www.ufjf.br/fernando_tadeu/citymetrics/).

### *Desdobramentos e trabalhos futuros*

Considerando o exposto nesta tese e, principalmente, a potencialidade de adaptação do sistema proposto a abordagens que possam ser suportadas por meio da implementação computacional de atributos mensuráveis, vislumbram-se como desdobramentos ou trabalhos futuros desta investigação:

- a) Procurar por referências de cálculo adicionais para o desenvolvimento de novas métricas e ferramentas, ou para aprimorar as já existentes. Um exemplo seria a pesquisa por estudos que estabeleçam relações mais consistentes para a penalização por inclinação nos percursos, utilizada no Algoritmo de Proximidade Física, no Algoritmo de Variedade de Serviços e no Algoritmo de Recorrência de Serviços;
- b) Investigar por conhecimentos de programação - VB.NET ou C#.NET, por exemplo, para o desenvolvimento de ferramentas de CityMetrics sob a forma de *add-ons* para o Grasshopper, o que poderá permitir uma maior disseminação e desempenho dos algoritmos elaborados;
- c) Em um contexto mais amplo, pode-se ainda investigar a respeito da implementação do conceito do sistema proposto em conjunção com outras teorias, conceitos ou modelos de desenvolvimento urbano existentes que, assim como o DOT, também sejam suportados por princípios essencialmente mensuráveis.
- d) Buscar meios de mensurar aspectos subjetivos, de maneira a poder incorporar estes aspectos diretamente no sistema elaborado.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALEXANDER, C., ISHIKAWA, S., & SILVERSTEIN, M. **A Pattern Language: Towns, Buildings, Construction**. Nova York: Oxford University Press, 1977.

ALTOON, R. & AULD, J. **Urban Transformations: Transit Oriented Development & The Sustainable City**. Mulgrave: The Images Publishing Group, 2011.

BEIRÃO, J. **CityMaker / Designing Grammars for Urban Design**. 2012. 272 f. Tese (Doutorado em Urbanismo) – Faculdade de Arquitetura, Delft University of Technology, Delft, 2012.

CALTHORPE, P. **The next American metropolis: ecology, community and the American dream**. Nova York: Princeton Architectural Press, 1993.

CALTHORPE, P. Introduction. In DITTMAR, H. & OHLAND, G. (Org.). **The new transit town: Best practices in Transit-Oriented Development**. Washington: Island Press, 2004.

CALTHORPE, P. & FULTON, W. **The regional city: planning for the end of sprawl**. Washington: Island Press, 2001.

CARR, L., DUNSIGEN, I., & MARCUS, B. **Validation of walk score for estimating access to walkable amenities**. *British journal sports medicine*, v.45, p. 1144-1158, 2011.

CELANI, G. **Algorithmic Sustainable Design. Uma visão crítica do projeto generativo**. Resenhas Online, ano 10, n. 116.03. 2011. Disponível em: <http://www.vitruvius.com.br/revistas/read/drops/10.030/2109>. Acesso em 20 de dez. 2011.

CERVERO, R. & KOCKELMAN, K. **Travel demand and the 3Ds: density, diversity, and design**. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2, pp. 199-219, 1997.

CHAKRABARTI, V. **A country of cities**. Nova York: Metropolis Books, 2013.

CIAUD. **Measuring Urbanity**. Disponível em: <http://www.measurb.org/en/seminar.html>. Acesso em 11 de nov. 2016.

CORBELLA, O. & BARBOSA, G. **Towards Sustainability: Urban Environmental Principles**. Proc. of the First Int. Conf. in Sustainable Cities, Morelia, Mexico, 2009.

DANTZIG, G. & SAATY, T. **Compact City: A plan for a liveable urban environment**. São Francisco: W. H. Freeman, 1973.

DOBESOVA, Z. & KRIVKA, T. **Walkability Index in the Urban Planning: A Case Study in Olomouc City**. In: BURIAN, J. (Ed.). *Advances in Spatial Planning*. Rijeka: InTech, 2012. p. 179-196.

DITTMAR, H. & OHLAND, G. (Org.). **The new transit town: Best practices in Transit-Oriented Development**. Washington: Island Press, 2004.

DITTMAR, H. & POTICHA, S. 'Defining Transit-Oriented Development: The New Regional Building Block. In: DITTMAR, H. & OHLAND, G. (Org.) **The New Transit Town: Best Practices in Transit Oriented Development**. Washington: Island Press, 2004.

DUARTE, J. P., BEIRÃO, J. N., MONTENEGRO, N., GIL, J. **City Induction: A Model for Formulating, Generating, and Evaluating Urban Designs**. In: ARISONA, S., ASCHWANDEN, G., HALATSCH, J., WONKA, P. (Eds.). **Digital Urban Modeling and Simulation**. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2012. p. 73-98.

FARR, D. **Urbanismo sustentável: Desenho urbano com a natureza**. Porto Alegre: Bookman, 2013.

FOOD4RHINO. **Disponível em: <http://www.food4rhino.com/>**. Acesso em 11 de jan. 2016.

FRANK, L., SCHMID, T., SALLIS, J., CHAPMAN, J., & SAELENS, B. **Linking objectively measured physical activity with objectively measured urban form: findings from SMARTRAQ**. *American Journal of Preventive Medicine*, 28, p. 117 – 125, 2005.

GEHL, J. **Cidades para pessoas**. São Paulo: Perspectiva, 2013.

GIL, J., BEIRÃO, J., MONTENEGRO, N., DUARTE, J. **Assessing computational tools for urban design: Towards a “City Information Model”**. *FUTURE CITIES [28th eCAADe Conference Proceedings / ISBN 978-0-9541183-9-6] ETH Zurich (Switzerland) 15-18 September 2010*, pp.361-369.

GIL, J. **Urban Modality: Modelling and evaluating the sustainable mobility of urban areas in the city-region**. 2016. 436 f. Tese (Doutorado em Urbanismo) – Faculdade de Arquitetura, Delft University of Technology, Delft. 2016.

GLAESER, E. **Os centros urbanos: a maior invenção da humanidade: como as cidades nos tornam mais ricos, inteligentes, saudáveis e felizes**. Nova York: Penguin, 2011.

GLOBAL FUEL ECONOMY. Disponível em: <http://www.globalfueleconomy.org/>. Acesso em: 10 de abr. 2016.

GRASSHOPPER3D. Disponível em: <http://www.grasshopper3d.com/>. Acesso em: 14 de jan. 2016.

GRUBER, T., B. **A translation approach to portable ontology specifications**. Knowledge Acquisition, 5(2), 257-267, 1993.

HENRIQUES, G. **TetraScript: sistema de aberturas responsivo para controlar a luz, de acordo com fatores externos e internos**. 2013. 448 f. Tese (Doutorado em arquitetura) – Faculdade de Arquitetura, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa. 2013.

HENRIQUES, G. & BUENO, E. **Geometrias complexas e desenho paramétrico**. DROPS Ano 10, fevereiro de 2010. Disponível em: <http://www.vitruvius.com.br/revistas/read/drops/10.030/2109>. Acesso em: 14 de jul. 2010.

HILLIER, B. & HANSON, J. **The social logic of space**. Cambridge: Cambridge University Press, 1984.

HILLIER, B., PENN, A., HANSON, J., GRAJEWSKI, T., XU, J. **Natural movement: or, configuration and attraction in urban pedestrian movement**. Environment and Planning B, v. 20, p. 29-66, 1993.

HOEK, J. **The MXI (Mixed use Index). An instrument for anti-sprawl policy?** In: Proceedings of the 44th ISOCARP congress, 2008.

HUMAN TRANSIT. Disponível em: <http://www.humantransit.org>. Acesso em 08 de jun. 2015.

JACOBS, J. **Morte e vida de grandes cidades**. São Paulo: Martins Fontes, 2011.

JUNDIAÍ (cidade). Secretaria de Planejamento e Meio Ambiente. **Urbanismo Caminhável Jundiaí – Centro: Índice de Caminhabilidade**. Jundiaí: Prefeitura de Jundiaí, 2015. 51p.

KHABAZI, Z. **Generative Algorithms using Grasshopper**. Londres, 2012.

KILKELLY, M. **5 razões para arquitetos aprenderem programação**. Archdaily. Disponível em: <http://www.archdaily.com.br/br/764687/5-razoes-de-porque-os-arquitetos-devem-aprender-a-programar-sofware>. Acesso em 07 de abr. de 2015.

KOLAREVIC, B. **Architecture in the digital age: design and manufacturing**. Londres: Taylor & Francis, 2005.

LEITE, C. **Cidades sustentáveis cidades inteligentes: Desenvolvimento sustentável num planeta urbano**. Porto Alegre: Bookman, 2012.

LIMA, F., KÓS, J., PARAIZO, R. **Algorithmic approach toward Transit-Oriented Development neighborhoods: (Para)metric tools for evaluating and proposing rapid transit-based districts**. *International Journal of Architectural Computing*. Vol. 14(2) 131–146, 2016.

\_\_\_\_\_. **Algorithms-Aided Sustainable Urban Design: Geometric and Parametric Tools for Transit-Oriented Development**. In: AMORUSO, G. Ed. *Handbook of Research on Visual Computing and Emerging Geometrical Design Tools*. Hershey: IGI Global, 2016. 875-897.

LIMENA, M. **Cidades complexas no século XXI, ciência, técnica e arte**. São Paulo em perspectiva, v. 15 n. 3, 2001.

MENGES, A. **Instrumental Geometry. Architectural Design. Techniques and Technologies in Morphogenetic Design**. Londres: Editorial Offices, v. 76, n. 2, 2006.

MINSKY, M. **Semantic Information Processing**. Cambridge: MIT Press, 1968.

MITCHELL, W. **Computer-aided architectural design**. Nova York: Van Nostrand Reinhold, 1977.

MITCHELL, W. & McCULLOUGH, M. **Digital Design Media**. Nova York: Van Nostrand Reinhold, 1991.

MONTENEGRO, N. **CityPlan: Contributo para o desenvolvimento de uma metodologia e ferramenta computacional para apoio ao desenho urbano**. 2015. 440 f. Tese (Doutorado em Urbanismo) – Faculdade de Arquitetura, Universidade de Lisboa, Lisboa. 2015.

NOURIAN, P., REZVANI, S., SARIYILDIZ, S., HOEVEN, F. **Configurbanist: Urban Configuration Analysis for Walking and Cycling via Easiest Paths**. In: 33rd eCAADe CONFERENCE, 2015. Viena, Áustria. Anais da 33ª Conferência eCAADe. Viena, Áustria: Universidade Técnica de Viena, 2015. 553-564.

OGRA, A. & NDBELE, R. **The role of 6ds in transit oriented development (TOD)**. in: Bahga, S. and Singla, A., Proceedings of the Neo-International Conference on Habitable Environments, CreateSpace, Jalandhar, India, 2014, 535-542.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **World Urbanization Prospects**. Nova York: United Nations, 2014.

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DE SAÚDE. Disponível em: <http://www.who.int/mediacentre/news/releases/2014/airpollution/en/>. Acesso em: 20 de jun. 2015.

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

PANERAI, P., CASTEX, J., DEPAULE, J. **Formas urbanas: a dissolução da quadra**. Porto Alegre: Bookman, 2013.

PERULLI, P. **Visões da Cidade. As Formas do Mundo Espacial**. São Paulo: Ed. Senac SP, 2012.

PICON, A. Foreword. In TERZIDIS, K. **Algorithmic Architecture**. Nova York: Routledge, 2006.

PIROUZNOURIAN. Disponível em: <https://sites.google.com/site/pirouznourian/configurbanist>. Acesso em: 28 de jan. 2016.

PONT, M. & HAUPT, P. **Spacematrix: Space, Density and Urban Form**. Rotterdam: NAI Publishers, 2010.

PUSHKAREV, B. & ZUPAN, J. **Public transportation and land use policy**. Nova York: Indiana University Press, 1977.

RECONNECTING AMERICA. **Why transit-oriented development and why now?** Disponível em: <http://www.reconnectingamerica.org/>. Acesso em: 12 de fev. 2016.

ROGERS, R. **Cidades para um pequeno planeta**. Barcelona: Gustavo Gili, 1997.

SALINGAROS, N. **Twelve lectures on architecture: Algorithmic sustainable design**. Solingen: Umbau-Verlag, 2010.

SÃO PAULO (cidade). Secretaria Municipal de Desenvolvimento Urbano. **Plano Diretor Estratégico do Município de São Paulo - Lei nº 16.050, de 31 de julho de 2014 - Estratégias ilustradas**. São Paulo: Prefeitura de São Paulo, 2014. 76p.

SAURO, J. **7 Methods for Discovering Usability Problems**. In: <http://www.measuringu.com/blog/discovering-problems.php>. Acesso em 14 de set. 2016

SCHEER, D. **The death of drawing: Architecture in the age of Simulation**. Nova York: Routledge, 2014.

SILVA, R. **Urbanismo paramétrico: parametrizando urbanidade**. Recife: Editora UFPE, 2010.

SILVA, R. & AMORIM, L. **Urbanismo paramétrico: emergência, limites e perspectivas de nova corrente de desenho urbano fundamentada em sistemas de desenho paramétrico**. In VIRUS. N. 3. São Carlos: Nomads USP, 2010.

SMART GROWTH. Disponível em: <https://smartgrowthtulsa.com/wp-content/uploads/2015/09/0122.jpg>. Acesso em: 22 de set. 2015.

STEINØ, N. **Parametric thinking in urban design – a geometric approach**. In: Amar Bennadji et al. (eds.): CAAD, Cities, Sustainability. Proceedings for the 5th ASCAAD 2010 Conference, October 19-21, 2010, National School of Architecture, Fez, Morocco. Aberdeen: Robert Gordon University, 2010. 261-270

STEINØ, N. & VEIRUM, N. **A Parametric Approach to Urban Design**. In: 23rd eCAADe CONFERENCE, 2005. Lisboa, Portugal. Anais da 23ª Conferência eCAADe. Lisboa, Portugal: Universidade Técnica de Lisboa, 2005. 679-686.

STINY, G. & GIPS, J. **Shape grammars and the generative specification of painting and sculpture**. In Information Processing 71, 1460–1465. North-Holland Publishing Company, 1972.

STUCHI, R. & LEITE, C. **Plano de desenvolvimento urbano estratégico de Nova Friburgo 2050**. Disponível em [www.stuchileite.com](http://www.stuchileite.com). Acesso em 22 set. 2015.

SUZUKI, H., CERVERO, R., IUCHI, K. **Transforming Cities with Transit: Transit and Land-Use Integration for Sustainable Urban Development**. Washington: World Bank, 2013.

TEDESCHI, A. **Algorithms-aided design: parametric strategies using grasshopper**. Brianza: Le Penseur, 2014.

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

TRANSIT COOPERATIVE RESEARCH PROGRAM. **Transit-Oriented Development in the United States: Experiences, Challenges, and Prospects**. Washington, 2004.

VALE, D. **Transit-oriented development, integration of land use and transport, and pedestrian accessibility: Combining node-place model with pedestrian shed ratio to evaluate and classify station areas in Lisbon**. Journal of Transport Geography. Vol. 45(2015) 70–80, 2015.

VELTEN, K. **Mathematical modeling and simulation: Introduction for scientists and engineers**. Weinheim: Wiley-VCH, 2009.

VEREBES, T. **Masterplanning: the adaptive city**. Nova York: Routledge, 2014.

VIRZI, R. **Refining the test phase of usability evaluation: How many subjects is enough?** Human Factors, 34, 457-471, 1992.

WALKSCORE. **Walkscore methodology**. Disponível em: <https://www.walkscore.com/methodology.shtml>. Acesso em 16 jun. 2014.

WIKIPÉDIA. Disponível em: [https://en.wikipedia.org/wiki/File:I-80\\_Eastshore\\_Fwy.jpg](https://en.wikipedia.org/wiki/File:I-80_Eastshore_Fwy.jpg). Acesso em 16 de jun. 2015.

WOODBURY, R. **Elements of parametric design**. Nova York: Routledge, 2010.

ZACHARIAS, J. **Pedestrian Behavior and Perception in the Urban Walking Environments**. *Journal of Planning Literature*, Vol. 16 No 1 p. 3-18, 2001.

ZAMPIERI, F. **Modelo Estimativo de Pedestres Baseado em Sintaxe Espacial, Medidas de Desempenho e Redes Neurais Artificiais**. 2006. Dissertação de mestrado. UFRGS, Porto Alegre, 2006.

