

CITYMETRICS: SISTEMA (PARA)MÉTRICO PARA ANÁLISE E OTIMIZAÇÃO DE CONFIGURAÇÕES URBANAS¹

CITYMETRICS: A (PARA)METRIC SYSTEM FOR THE ANALYSIS AND OPTIMIZATION OF URBAN CONFIGURATIONS

FERNANDO TADEU DE ARAÚJO LIMA, NUNO MONTENEGRO, RODRIGO CURY PARAIZO, JOSÉ RIPPER KÓS

RESUMO

Este artigo apresenta e avalia a implementação de *CityMetrics*: um sistema computacional 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 área urbana. Assim, este artigo aborda o uso de recursos computacionais e ferramentas algorítmicas elaboradas para mensurar a performance de áreas urbanas, sob a perspectiva de princípios objetivamente mensuráveis do Desenvolvimento Orientado pelo Transporte Sustentável, um modelo de desenvolvimento urbano que visa a cidades mais autônomas e mais sustentáveis. A presente pesquisa visa a verificar como atributos mensuráveis, geométricos e algébricos (e, portanto, programáveis) podem ser utilizados em um modelo computacional que utiliza métodos de otimização para dar suporte à tomada de decisão no processo de projetos urbanos.

PALAVRAS-CHAVE: Desenvolvimento orientado pelo transporte sustentável. Lógica algorítmica. Otimização. Parametrização. Projeto urbano.

ABSTRACT

This paper describes and evaluates the implementation of CityMetrics: a computational system that articulates performance evaluation metrics and algorithmic-parametric features and functionalities, so as to analyse and optimize different aspects related to the degree of efficiency and the possibilities of operation of geometric and algebraic configurations of a given urban area. In this context, this article 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, a urban development model dedicated to more autonomous and sustainable cities. More specifically, this research aims at verifying how 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.

KEYWORDS: Transit oriented development. Algorithmic logic. Optimization. Parameterization. Urban design.



INTRODUÇÃO

O conteúdo deste artigo se refere a um contexto de interseção entre a implementação de recursos computacionais — mais especificamente àqueles referentes à utilização da modelagem algorítmica e paramétrica e a implementação de “atributos mensuráveis (ou métricas) relacionados ao desempenho de configurações urbanas², visando a contribuir para o desenvolvimento de métodos de análise e otimização que forneçam suporte à tomada de decisão em tarefas de projeto urbano” (LIMA, 2017, p.23).

Mais especificamente, este artigo descreve e avalia a implementação de *CityMetrics*: um sistema computacional de suporte à tomada de decisão em tarefas de projeto e planejamento urbano. Esse sistema utiliza métricas para calcular diferentes índices, que permitem analisar e otimizar o desempenho de configurações urbanas. Com isso, *CityMetrics* pode ser utilizado para analisar e propor modificações em bairros e cidades, por meio da análise e da otimização de desempenho de uma determinada área, com base em um conjunto de princípios mensuráveis.

O sistema é projetado para fornecer respostas rápidas, quase em tempo real, com a intenção de ajudar ao projetista (ou aos diversos atores envolvidos) no processo de tomada de decisão. Baseia-se no princípio do computador como ferramenta auxiliar da imaginação; ao obter rapidamente os resultados de diversas simulações, o projetista pode se concentrar mais no esforço de criar e refinar cada proposta, e testar mais alternativas. O sistema trabalha tanto fornecendo uma resposta otimizada — que pode, a partir daí, ser adaptada de tantas maneiras quanto necessário —, quanto avaliando conjunturas existentes. Se, à primeira vista, *CityMetrics* poderia ser tomado como um meio de assegurar a primazia da técnica, conduzindo à aplicação irrestrita e cega de índices urbanísticos, trata-se, na verdade, de fornecer ferramentas para permitir ao projetista que justamente possa dominar e incorporar esses índices ao processo de projeto de modo fluido.

Por outro lado, é preciso reconhecer que o sistema, como modelagem paramétrica, contribui para a discussão sobre as mudanças nos sistemas de notação da arquitetura, ao inscrever na notação da modelagem as fórmulas de geração do modelo (CARPO, 2011), contribuindo para a descrição dos processos (ALLEN, 2009).

Sendo assim, foi tomado como objeto de estudo o Desenvolvimento Orientado pelo Transporte Sustentável (DOTS): um modelo de desenvolvimento urbano que se tornou uma das principais referências de planejamento destinadas a criar bairros caminháveis, compactos e de uso misto, centrados em sistemas de transporte de alta qualidade e no incremento dos deslocamentos ativos (a pé ou de bicicleta). Este modelo de desenvolvimento e de organização urbana — cujas premissas foram propostas por Calthorpe (1993) —, preconiza a criação de cidades que não dependam exclusivamente do automóvel para os deslocamentos diários e está sendo crescentemente implementado ao redor do mundo como um paradigma mais adequado para a organização de bairros e centros urbanos

sustentáveis (DITTMAR & OHLAND, 2004; FARR, 2012; LEITE, 2012). O fato desses princípios já terem um amplo desenvolvimento de suas métricas, tornou-os ideais para o desenvolvimento do sistema, permitindo que a pesquisa se concentrasse na elaboração dos algoritmos, e não dos índices, por exemplo.

Neste contexto, é possível identificar alguns princípios básicos do DOTS que são suportados por atributos essencialmente mensuráveis (ou computáveis), são eles: (a) a acessibilidade ao transporte — consiste no posicionamento de habitações, comércios e serviços em torno de estações de transporte, visando a proporcionar curtas distâncias aos locais de acesso ao transporte coletivo; (b) a caminhabilidade — compreendida, no contexto deste trabalho, como a capacidade que um determinado bairro ou cidade possui de conectar, por meio de distâncias que podem ser percorridas a pé, habitações e diversos serviços urbanos, visando a conferir maior vitalidade às ruas e ao bairro como um todo; (c) a diversidade — quantidade e distribuição de diferentes usos e funções em um mesmo bairro, visando a proporcionar maior autonomia e descentralização urbana, e; (d) a compacidade — alta ocupação dentro dos bairros, de maneira compacta e que vise a suportar diferentes modais de transporte (CERVERO & KOCKELMAN, 1997; CALTHORPE & FULTON, 2001; DITTMAR & OHLAND, 2004; LIMA, 2017).

Portanto, os princípios básicos do DOTS apontados acima podem ser aferidos por meio de diversas métricas, que consideram atributos geométricos, algébricos e computáveis/mensuráveis. Entre os aspectos relacionados a essas métricas estão: (a) a quantificação e o posicionamento de residências, comércios, serviços e demais funções urbanas; (b) as distâncias entre determinados pontos de interesse de um bairro (entre uma ou mais residências e uma escola, por exemplo); (c) a proporção entre áreas residenciais e não-residenciais de uma determinada localidade, e; (d) os indicadores relativos a densidade de um lote, quadra, bairro ou cidade (LIMA, 2017). Ou seja, esses atributos podem ser “diretamente associados a entidades geométrico-matemáticas como coordenadas, números, pontos, curvas, polígonos e sólidos, por exemplo” (LIMA, 2017, p.29). Logo, estas métricas podem ser utilizadas enquanto parâmetros para a realização de diversas operações computacionais, possibilitando gerar e avaliar diferentes cenários para a obtenção de soluções em contextos urbanísticos.

Nos casos estudados, *CityMetrics* permite avaliar a “performance” de configurações urbanas, utilizando métricas físicas (distância física, considerando e penalizando inclinações nos trajetos), métricas topológicas³, indicadores de densidade e resultados de operações matemáticas, que podem ser configurados como funções-objetivo em processos de otimização, a fim de obter soluções mais eficientes para configurações urbanas dentro do escopo do DOTS. Assim, este artigo se encontra estruturado por meio da apresentação sequencial de: (a) uma descrição e uma apresentação de *CityMetrics*, suas estratégias e o conjunto de ferramentas desenvolvido; (b) uma exposição da aplicação

do sistema proposto em dois ensaios, que visaram a permitir avaliar a implementação de *CityMetrics* em diferentes abordagens para adequar uma área urbanas aos princípios do DOTS; (c) uma análise sobre os resultados obtidos, e; (d) uma discussão e conclusões gerais sobre o sistema e suas possibilidades de utilização.

CITYMETRICS: ESTRATÉGIAS E FERRAMENTAS

CityMetrics consiste em um sistema⁴ computacional baseado em uma metodologia algorítmico-paramétrica (LIMA, 2017; LIMA et al., 2017) articulado por meio das seguintes estratégias metodológicas: (a) Linguagem de Programação Visual⁵ (LPV); (b) Sistemas Generativos⁶ (SG), e; (c) Otimização⁷. Logo, conceitualmente, *CityMetrics* pode ser sintetizado por meio da elaboração de Sistemas Generativos em Linguagem de Programação Visual, de maneira a utilizar ferramentas algorítmicas especificamente desenvolvidas (ou adaptadas) para articular métricas de avaliação de desempenho e operações lógicas, visando a fornecer índices que podem ser utilizados como funções-objetivo em tarefas de otimização. A Figura 1 ilustra a articulação das estratégias que sintetizam o conceito de *CityMetrics*.

Portanto, *CityMetrics* foi elaborado para mensurar e otimizar o desempenho de configurações urbanas por meio de métricas relacionadas a princípios mensuráveis, derivados do Desenvolvimento Orientado pelo Transporte Sustentável (DOTS). Nesse cenário, esse sistema visa a fornecer suporte à tomada de decisão em processos de projeto e planejamento urbano que abordem questões relativas ao DOTS, bem como a

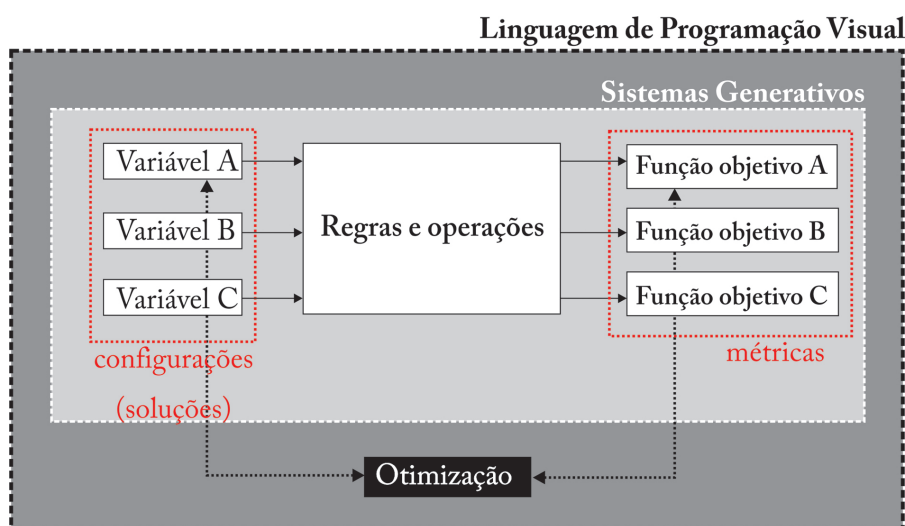


FIGURA 1 — Articulação das estratégias fundamentais para a formulação e utilização de *CityMetrics*.

Nota: O sistema proposto se estabelece por meio da elaboração de Sistemas Generativos construídos em Linguagem de Programação Visual, para mensurar, utilizando métricas de desempenho, características relacionadas a princípios básicos do DOTS, associando-os a diferentes funções-objetivo em tarefas de otimização, de maneira a fornecer soluções para configurações geométricas urbanas.

Fonte: Lima (2017, p.126).

outros contextos e situações de natureza semelhante. Mais especificamente, o conceito central de *CityMetrics* é o de utilizar ferramentas algorítmicas para calcular métricas urbanas que podem ser utilizadas para analisar a performance de uma determinada área urbana, ou podem ser configuradas enquanto funções-objetivo em tarefas de otimização. Sendo assim, o sistema proposto utiliza as seguintes ferramentas (LIMA, 2017): (i) Algoritmo de Proximidade Física (APF): permite calcular os percursos com as menores distâncias físicas entre diversas origens e alvos de uma localidade, considerando ainda as inclinações nos trajetos; (ii) Algoritmo de Proximidade Topológica (APT): calcula 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; (iii) Algoritmo de Variedade de Serviços (AVS): calcula a média das distâncias entre uma determinada origem e todos os alvos próximos em uma determinada categoria de serviços urbanos; (iv) Algoritmo de Recorrência de Serviços (ARS): 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; (v) Algoritmo de Uso Misto (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, e; (vi) Algoritmo de Indicadores *Spacematrix*: visa a fornecer os cálculos para a medição da densidade de áreas estudadas, informando os três indicadores fundamentais propostos por Pont e Haupt (2010).

ALGORITMO DE PROXIMIDADE FÍSICA

O Algoritmo de Proximidade Física (APF) é uma ferramenta que permite calcular os percursos com as menores distâncias físicas entre diversas localidades e serviços urbanos de um bairro⁸, considerando ainda as inclinações nos trajetos. Para isso, o APF considera o posicionamento das origens (todos os lotes de um bairro, por exemplo), o desenho da rede de ruas e o posicionamento de um ou mais alvos de interesse (serviços urbanos, como escolas ou supermercados, por exemplo) para mensurar a proximidade física, de acordo com as referências de cálculo apresentadas por Lima (2017). Assim, se um determinado lote (origem) está a até 400m de distância (5 min de caminhada) de um alvo, é atribuído a ele um índice de valor 1. À medida que a distância entre uma determinada origem e o alvo mais próximo se aproxima de 1,6km (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 1,6km.

Além disso, o APF também permite aplicar um fator de penalização para percursos inclinados. Assim, quanto maior for a inclinação de um determinado trecho, maior será a penalização deste percurso. Por exemplo, ao considerar um trajeto plano de 400m, o algoritmo atribui o índice 1 (máximo) a esse percurso. Se, no entanto,

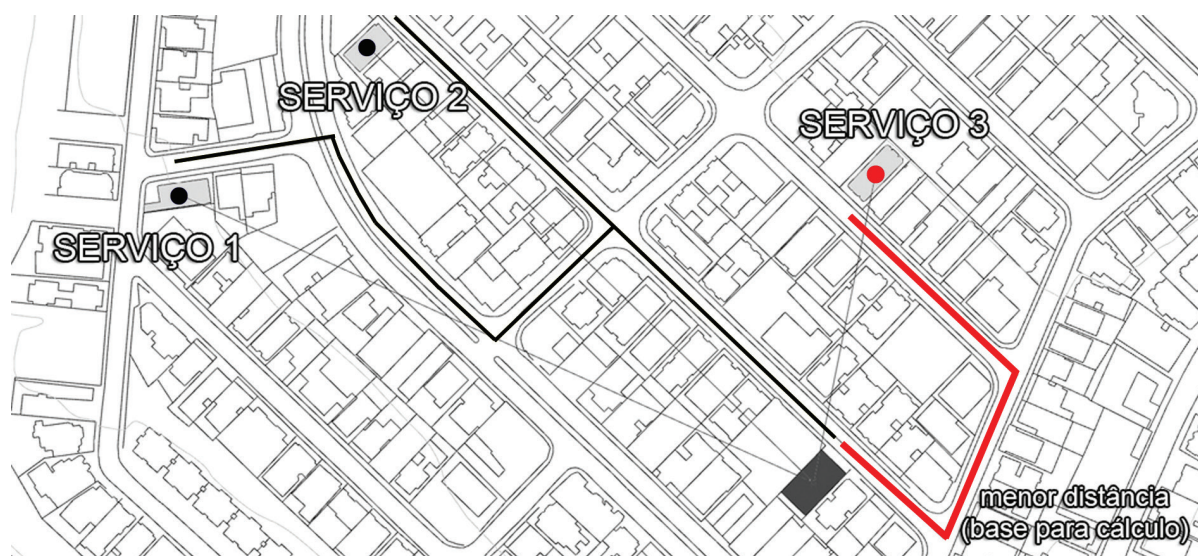


FIGURA 2 — Lógica do cálculo do APF para múltiplos alvos.

Nota: 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: Lima (2017, p.134).

um outro percurso também for de 400m, mas com uma inclinação de 10%, então o índice atribuído a este deslocamento sofre uma penalização de 10%, resultando em um índice de 0,9⁹.

Sendo assim, o APF pode ser utilizado para mensurar a acessibilidade ao transporte ou a caminhabilidade de uma determinada localidade, visando a medir a distância entre diferentes origens e alvos. Ou seja, enquanto a acessibilidade ao transporte pode se relacionar 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.

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 2 ilustra a lógica de cálculo deste algoritmo.

ALGORITMO DE VARIEDADE DE SERVIÇOS

O Algoritmo para cálculo da Variedade dos Serviços (AVS) visa a permitir verificar um outro aspecto importante para a avaliação da caminhabilidade de uma determinada

localidade: a proximidade entre uma origem e todos os alvos (serviços urbanos) ao seu alcance. Nesse sentido, essa ferramenta utiliza a base desenvolvida na ferramenta APF, mas calcula a média das distâncias entre uma determinada origem e todos os alvos próximos em uma determinada categoria de serviços urbanos. Este algoritmo, portanto, 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 essa mesma origem e todos os alvos informados em uma mesma categoria, conforme demonstra a Figura 3. Esse 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.

ALGORITMO DE RECORRÊNCIA DE SERVIÇOS

O algoritmo para cálculo da Recorrência dos Serviços (ARS) também visa a permitir mensurar a caminhabilidade de uma área urbana e trabalha de maneira complementar às ferramentas APF e AVS. Enquanto as duas 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 urbanos) e o número

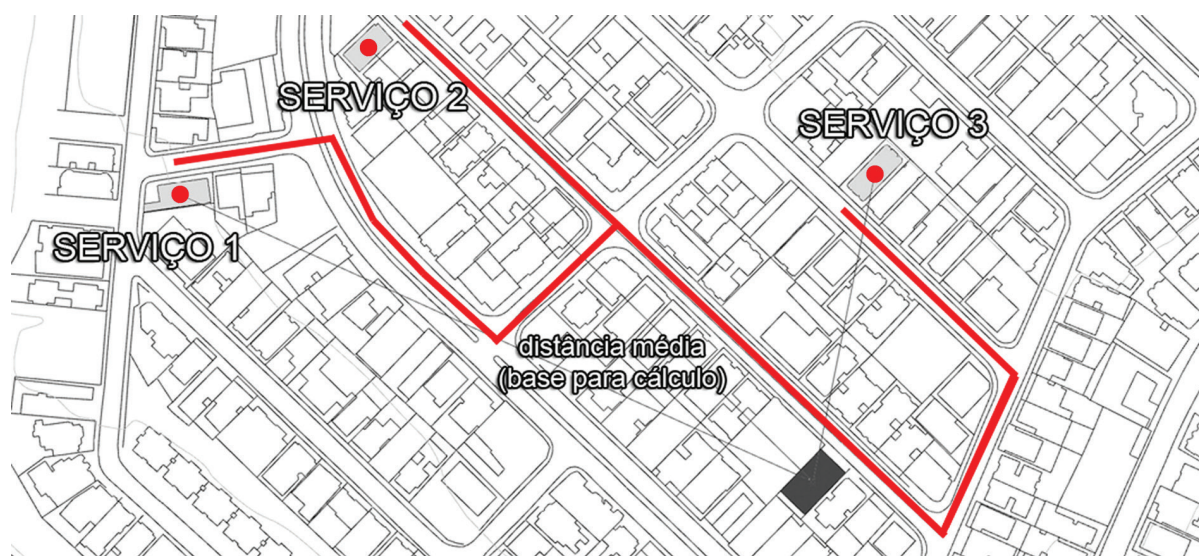


FIGURA 3 — Base de cálculo do AVS.
Fonte: Lima (2017, p.136).

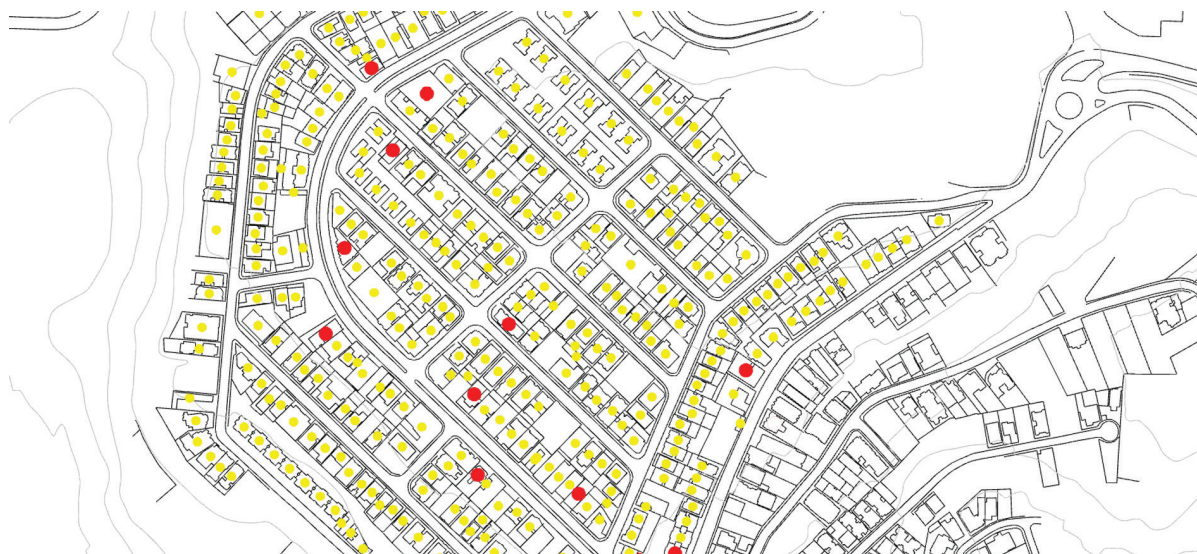


FIGURA 4 – Lógica de cálculo do ARS.

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

Fonte: Lima (2017, p.137).

total de localidades de uma área analisada, conforme ilustra a Figura 4. Este algoritmo, cuja operação básica consiste em efetuar a contagem de alvos dentro de um raio de 20 minutos de caminhada e dividir esse 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.

ALGORITMO DE PROXIMIDADE TOPOLÓGICA

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 a métrica topológica, utilizando conceitos da teoria da Sintaxe Espacial de Hillier e 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, essa 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, conse-

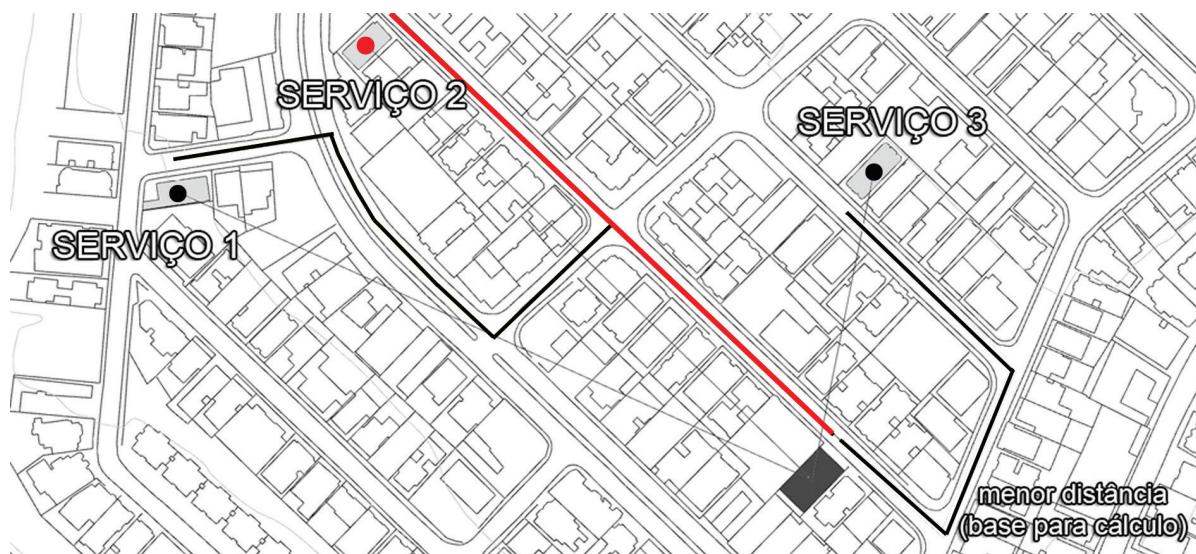


FIGURA 5 — Ilustração do cálculo do APT.

Nota: 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: Lima (2017, p.140).

quentemente, possuem maior relevância na dinâmica de uma área urbana. A Figura 5 exemplifica como se dá o cálculo das distâncias topológicas.

ALGORITMO DE USO MISTO

O algoritmo para cálculo do índice de Uso Misto (AMXI) visa a permitir mensurar objetivamente a diversidade de um bairro, rua ou cidade. 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 determinada área urbana, comparando as proporções entre elas. Segundo Hoek (2008), quanto mais próxima a relação entre as áreas é de 50/50, maior a diversidade de uma área urbana estudada. 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 6 apresenta a base de cálculo do AMXI.

ALGORITMO DE INDICADORES SPACEMATRIX

O algoritmo de Indicadores *Spacematrix* visa a fornecer os cálculos para a medição da densidade de áreas estudadas, informando os três indicadores fundamentais propostos por Pont e Haupt (2010): intensidade (*Floor Space Index*, FSI), cobertura (*Ground Space Index*, GSI) e densidade de rede (*Network Density*, N).

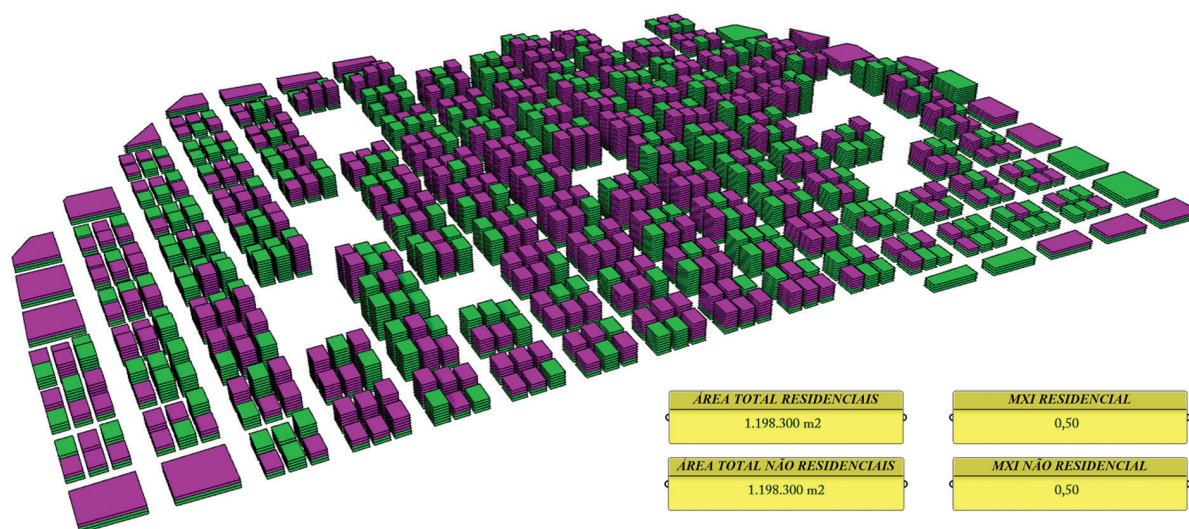


FIGURA 6 — Lógica de cálculo do AMXI.

Nota: 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: Lima (2017, p.142).



FIGURA 7 — Lógica de cálculo para Spacematrix.

Nota: Elementos utilizados para cálculo dos indicadores *Spacematrix*: valor total de áreas construídas, valor total de áreas ocupadas, comprimento de rede de ruas e área total, respectivamente.

Fonte: Lima (2017, p.143), adaptado de Pont e Haupt (2010).

Neste contexto, uma vez fornecidos os contornos da área analisada, o desenho 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 uma avaliação dinâmica das áreas urbanas estudadas e das intervenções/modificações propostas. A Figura 7 ilustra os elementos necessários para cálculo do *Spacematrix*.

ENSAIOS

Esta seção consiste na descrição da aplicação de *CityMetrics* em dois experimentos diferentes para uma mesma localidade: o bairro Cascatinha, na cidade de Juiz de Fora, Minas Gerais. O principal objetivo destes ensaios é o de verificar o potencial do sistema para abordar uma determinada área urbana, considerando o escopo apresentado. Apesar de ser um bairro predominantemente residencial, a área estudada possui um grande potencial para ser mais autônoma e sustentável, apresentando algumas características que a tornam uma amostra ideal para avaliação do sistema proposto, como: (a) uma extensão adequada para implementação do DOTS (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. Esses aspectos proporcionam um cenário adequado para avaliar *CityMetrics*, pois, além de demonstrar os problemas típicos do modelo de cidade espalhada, também apresenta algumas importantes restrições e condicionantes para uma avaliação do sistema.

Nesse contexto, foi criado um modelo paramétrico da vizinhança selecionada, com o intuito de permitir gerenciar atributos geométricos e mensuráveis relacionados aos princípios do DOTS. Sendo assim, as seguintes informações foram obtidas e transferidas para o modelo de análise: (a) o desenho da rede de ruas e as projeções, número de andares, usos (residencial e não-residencial) e posicionamento topográfico de cada edifício dentro no bairro, visando a medir distâncias, inclinações, possíveis caminhos de conexão, e indicadores relacionados à diversidade e à densidade; (b) a localização de cada um dos serviços urbanos do bairro, de acordo com as categorias anteriormente mencionadas, para medir proximidade, recorrência e variedade de serviços (APF, AVS, ARS); (c) a identificação de áreas disponíveis para edifícios novos (lotes vagos e lugares não consolidados), no sentido de permitir avaliar novos cenários de ocupação e modificar a diversidade e a densidade do bairro; (d) o desenho de blocos e lotes, a fim de fornecer avaliação de densidade (*Spacematrix*).

Daí em diante as ferramentas de *CityMetrics* utilizaram os dados do bairro, emulados por entidades matemáticas, como *inputs* para operações de simulação e otimização, visando a melhorar os índices relacionados à acessibilidade ao transporte, à caminhabilidade, à diversidade e à compacidade, pelos seguintes fluxos de trabalho, descritos em sequência:

ENSAIO 1: OTIMIZAÇÃO MULTI-OBJETIVO EM ÁREA EXISTENTE

O Ensaio 1 pode ser descrito por meio das seguintes etapas: (i) busca pela melhor localização para inserir uma estação de transporte — considerando que o bairro não possui uma —, usando índices de Proximidade Física; (ii) a procura pela melhor localização para inserir um novo serviço urbano (para cada categoria) no bairro, com o objetivo de

aumentar os índices relacionados à caminhabilidade e considerando apenas métricas físicas — APF, AVS e ARS; (iii) a avaliação de diferentes cenários de ocupação para os lotes vagos, calculando automaticamente o índice de uso misto para uma distribuição mais equilibrada entre áreas residenciais e não-residenciais; (iv) a avaliação dos indicadores de *Spacematrix*, a fim de utilizar as diferentes estratégias de ocupação e ajudar a analisar as soluções propostas dentro do escopo do DOTS. A Figura 8 ilustra o fluxo da abordagem adotada neste Ensaio.

ENSAIO 2: MÉTRICAS FÍSICAS E TOPOLÓGICAS EM ÁREA EXISTENTE

O Ensaio 2 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 1 como base para a elaboração dos experimentos. Apesar de os objetivos gerais dos Ensaios 1 e 2 serem os mesmos (utilizar o sistema proposto para avaliar e sugerir modificações na configuração do bairro), 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. Assim, o Ensaio 2 pode ser sintetizado pelas seguintes etapas: (i) avaliação de diferentes cenários de ocupação para as áreas vagas, calculando automaticamente o índice de uso misto para uma distribuição mais equilibrada

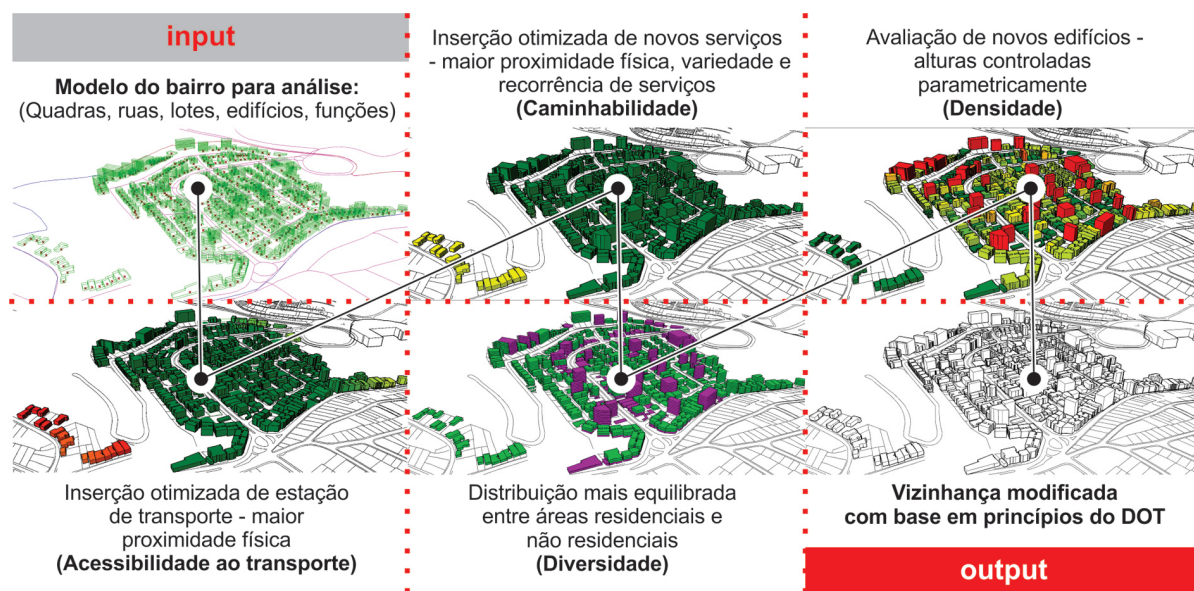


FIGURA 8 — Sequência de etapas do experimento referente ao Ensaio preliminar 3.

Nota: *CityMetrics* foi utilizado para abordar apenas métricas físicas na proposição de: (a) um maior equilíbrio na diversidade do bairro, com novos cenários de ocupação para os lotes vagos; (b) inserção de estação de transporte e de outros serviços urbanos, nas localizações com melhores índices de proximidade disponíveis, encontradas por meio de otimização.

Fonte: Lima (2017, p.172).

entre áreas residenciais e não-residenciais; (ii) uma avaliação paramétrica dos indicadores de *Spacematrix*, a fim de identificar limitações ou potencialidades de densidade dentro do escopo do DOTS. Neste Ensaio, o APT foi utilizado para medir a integração de cada um dos lotes disponíveis, permitindo indicar ocupações maiores para locais com maior integração; (iii) a procura pela melhor localização para inserir uma estação de transporte, utilizando métricas físicas e topológicas e considerando, ainda, a área total construída de cada lote. Assim, procurou-se priorizar a proximidade da estação a lugares com maior potencial para abrigar (residindo ou trabalhando) mais pessoas, e; (iv) a busca pela melhor localização para inserir um novo serviço urbano para cada categoria, com o objetivo de aumentar os índices relacionados à caminhabilidade — APF, AVS, ARS e APT —, com apenas um novo serviço por categoria. A Figura 9 ilustra a ordem dos procedimentos neste Ensaio.

ANÁLISE DE RESULTADOS

Os Ensaio 1 e 2 consistem na implementação de *CityMetrics* em uma mesma área urbana existente. A diferença entre eles é que enquanto no Ensaio 1 apenas métricas físicas foram abordadas (APF, AVS, ARS), no Ensaio 2 foram empregadas métricas físicas e topológicas (APF, AVS, ARS e APT), simultaneamente. Essa alteração possibilitou alguns rearranjos na ordem das operações do Ensaio 2, que abordou ainda cálculos de média ponderada para a obtenção de soluções.

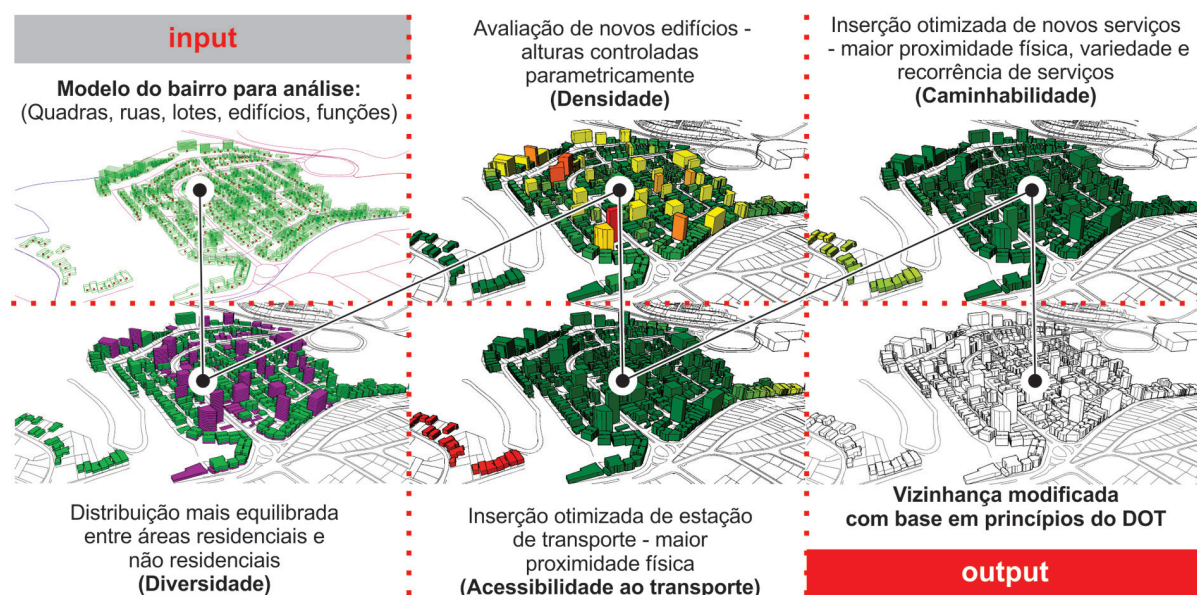


FIGURA 9 — Sequência de etapas do experimento referente ao Ensaio 4.

Nota: *CityMetrics* foi utilizado para abordar métricas físicas e topológicas na proposição de: (a) um maior equilíbrio na diversidade do bairro, com novos cenários de ocupação para os lotes vagos e maior ocupação em áreas mais integradas; (b) inserção de estação de transporte e de outros serviços urbanos, nas localizações com melhores índices de proximidade disponíveis, encontradas por meio de otimização.

Fonte: Lima (2017, p.184).

Portanto, a implementação de *CityMetrics* através de diferentes abordagens indicou alterações (ou soluções) diferentes para o arranjo do bairro, ambas sugerindo um melhor desempenho, sob a perspectiva do escopo do DOTS. Em síntese, as novas configurações fornecidas sugerem: (a) uma excelente acessibilidade ao transporte, uma vez que a inserção otimizada de uma estação de transporte permitiu altas pontuações médias de proximidade da estação em ambos os ensaios; (b) uma maior caminhabilidade para o bairro, em ambos os ensaios, uma vez que a inserção otimizada de novos serviços proporcionou um aumento dos índices de Proximidade Física, Variedade de Serviços, Recorrência de Serviços e Proximidade Topológica (apenas no Ensaio 2) em todas as categorias analisadas; (c) um bairro com mais diversidade, uma vez que a proposição de novos edifícios e seus usos proporcionou um índice de uso misto mais balanceado, buscando um maior equilíbrio entre locais residenciais e não-residenciais; (d) uma densidade mais adequada para um bairro orientado pelo DOTS, uma vez que as geometrias urbanas parametricamente controladas possibilitaram regular a densidade, de forma a suportar mais pessoas mais próximas de pontos de acesso ao transporte. Os índices de proximidade e diversidade aumentaram após as tarefas de otimização, sugerindo que os serviços se tornaram mais próximos e mais equilibrados nos arranjos propostos para o bairro.

Neste contexto, no Ensaio 1, podemos observar as seguintes características: (a) a proposição paramétrica dos edifícios para os lotes vagos ocorreu em uma relação direta e uniforme — todos os prédios propostos tiveram o mesmo número de pisos, apesar de suas diversas características e posicionamentos; (b) as soluções foram baseadas em aspectos específicos das métricas físicas, como APF, AVS e ARS para o posicionamento da estação e dos novos serviços urbanos, e; (c) as funções objetivo para otimização referiram-se às médias simples dos índices de todos os lotes, o que não permitiu considerar pesos diferentes para localidades de acordo com suas especificidades.

No Ensaio 2, os seguintes aspectos podem ser destacados: (a) introduziu-se o APT, que permitiu calcular a integração de cada lote existente e possibilitou estabelecer diferentes alturas para os edifícios propostos, visando a uma ocupação maior em áreas de maior recorrência de pedestres; (b) buscou-se soluções que estabeleceram *trade-offs* entre métricas físicas e topológicas, oportunizando considerar mais índices e diferentes critérios para posicionar a estação e os novos serviços — PPC, AVC, ARC e TPC, e; (c) notou-se que as funções-objetivo adotadas referiram-se às médias ponderadas dos índices de todos os lotes, viabilizando considerar pesos diferentes, de acordo com sua área construída total —, priorizando o posicionamento da estação (ou serviços) em áreas com potencial para abrigar (residindo ou trabalhando) mais pessoas.

Assim, a comparação entre os resultados obtidos nos ensaios fornecem os seguintes dados: (a) o Ensaio 1 apresenta índices de PF para a estação e para os serviços iguais ou ligeiramente melhores do que os do Ensaio 2, entretanto; (b) o Ensaio 2

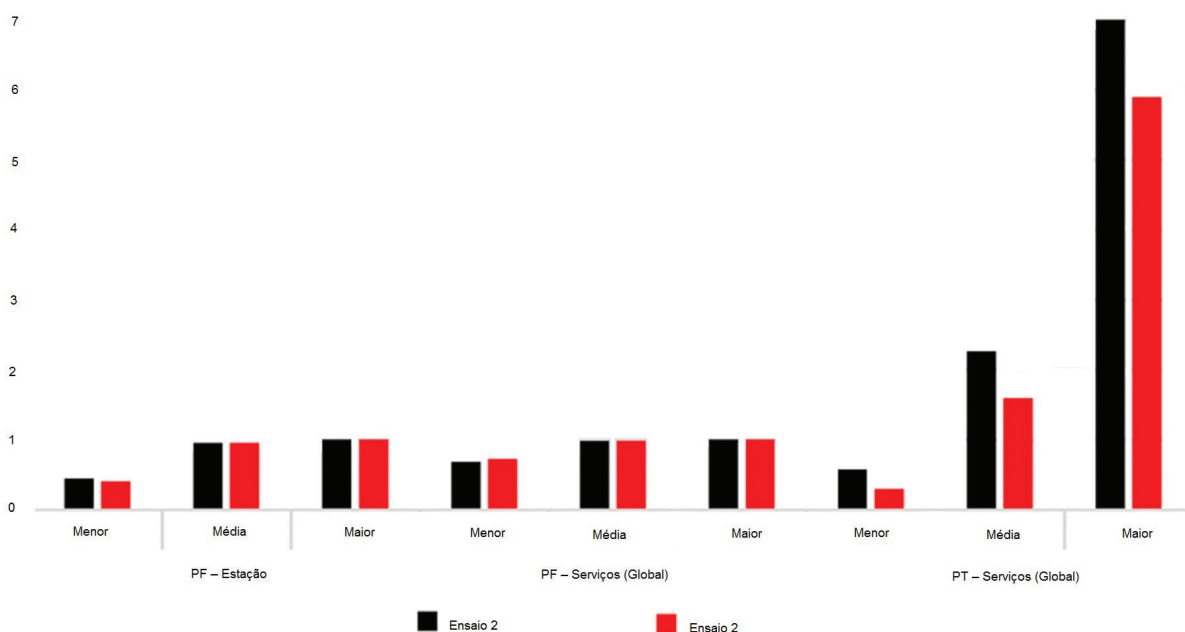


FIGURA 10 — Gráfico ilustrando a comparação de resultados entre o Ensaio 1 (em preto) e o Ensaio 2 (em vermelho).

Nota: PF: Proximidade Física; PT: Proximidade Topológica. Elevados índices de PF relacionados à acessibilidade ao transporte e à caminhabilidade em ambas situações. Índices de PT significativamente melhores (mais baixos) no Ensaio 2.

Fonte: Lima (2017, p.203).

apresenta uma configuração que contempla também aspectos relacionados à métrica topológica, o que se reflete em índices de PT melhores (nesse caso, mais baixos) que os do Ensaio 1, com índices similares de PF e VS. Ademais, a utilização da média ponderada permitiu a obtenção de soluções mais direcionadas às áreas com maior ocupação e integração. A Figura 10 ilustra comparações entre os resultados obtidos nos ensaios.

DISCUSSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS

A investigação aqui apresentada aborda a combinação entre métricas de avaliação de desempenho e recursos algorítmico-paramétricos no suporte à tomada de decisão em tarefas de projeto urbano, por meio da concepção de um sistema — *CityMetrics* —, para analisar e otimizar a performance de áreas urbanas. Esse sistema pode ser constantemente modificado, é sustentado por uma série de estratégias computacionais e considera a utilização de uma série de ferramentas algorítmico-paramétricas que utilizam referências de desempenho enquanto métricas para avaliar o grau de eficiência e as possibilidades de operação de bairros e cidades.

Como dito na introdução, a incorporação dos princípios do DOTS não implica que o sistema só possa ser aplicado neste contexto, ou, de modo mais amplo, que tenha por objetivo ensinar uma dominância da submissão aos índices como finalidade do projeto

urbano, em detrimento de questões mais subjetivas e humanísticas. Embora um risco, o que se pretende é que, ao trazer os índices para dentro do processo, eles possam ser incorporados com fluidez em tarefas de planejamento e projeto urbano, possibilitando que a construção e a aplicação estejam também no âmbito da discussão projetual.

Dessa maneira, *CityMetrics* pretende contribuir no sentido de uma nova maneira de se pensar os espaços urbanos. À medida que o sistema permite implementar novas estratégias, instrumentos e procedimentos ao processo projetual, ele pode ser considerado como o introdutor de uma importante transformação nos métodos convencionais de planejamento e projeto urbano.

Neste contexto, torna-se possível combinar métricas relativas ao desempenho de configurações formais urbanas e recursos algorítmico-paramétricos, de maneira a potencializar a utilização de recursos computacionais em abordagens que requeiram um tratamento dinâmico e eficiente da grande quantidade de dados envolvida, visando a incorporar um conjunto de variáveis e dar a elas visibilidade formal-espacial em tempo real (ou em tempo suficiente para retroalimentar o processo de projeto, seja por projetistas ou por outros atores envolvidos).

Por fim, considerando que o sistema proposto se baseia, essencialmente, na implementação computacional de atributos objetivamente mensuráveis, enquanto métricas de avaliação de desempenho, é possível afirmar que *CityMetrics* possui potencialidade para ser utilizado em projetos urbanos de outras naturezas e propósitos (e que, inclusive, extrapolem o escopo do DOTS), adaptando ou incluindo outras métricas para análise e otimização. Ou seja, pode-se afirmar que: (a) a utilização de *CityMetrics* pode ser aplicada, por extensão, a demais situações de planejamento e projeto que abordem aspectos relacionados às métricas consideradas nesta pesquisa, e; (b) o sistema proposto pode ser adaptado para incorporar outros atributos de desempenho que sejam objetivamente mensuráveis (e.g. térmico, acústico, aerodinâmico) — o que significaria uma pesquisa por novas métricas e a elaboração de novas ferramentas (ou a adaptação das existentes).

AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, ao Centro de Investigação em Arquitectura, Urbanismo e Design da Universidade de Lisboa e ao Programa de Pós-Graduação em Urbanismo da Universidade Federal do Rio de Janeiro, pelo suporte concedido para o desenvolvimento desta pesquisa.

NOTAS

1. Artigo elaborado a partir da tese de F.T.A. LIMA, intitulada “Métricas Urbanas: Sistema (para métrico para análise e otimização de configurações urbanas de acordo com métricas de avaliação de desempenho”. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2017.
Apoio: Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (Processo nº 200760/2015-7).
2. “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 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” (LIMA, 2017, p.20).
3. “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 interliga-los, por exemplo. Essa métrica é especialmente importante para esta pesquisa, pois, segundo Hillier e 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” (LIMA, 2017, p.139).
4. No âmbito desta pesquisa, o termo “sistema” se refere, mais especificamente, 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.
5. 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 (LIMA, 2017). Na pesquisa em questão, foi utilizado o *plug-in Grasshopper®*, um editor gráfico de algoritmos integrado com as ferramentas de modelagem 3D do *software Rhinoceros*.
6. 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.
7. A otimização matemática, ou simplesmente otimização, se refere à utilização de procedimentos computacionais para a resolução de um determinado problema, por meio da procura soluções ótimas entre as alternativas possíveis de um sistema.
8. As categorias de serviços urbanos consideradas nesta pesquisa são: Educação, Alimentação, Comércio, Entretenimento, Recreação, Saúde e Outros. Obviamente, também é possível considerar outras categorias, dependendo das necessidades de cada situação específica.
9. 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, 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.

REFERÊNCIAS

- ALLEN, S. II Notations + Diagrams: Mapping the Intangible. In: ALLEN, S. Architecture, technique and representation. 2nd. ed. London: Routledge, 2009. p.41-69.
- CALTHORPE, P. *The next American metropolis: Ecology, community and the American dream*. New York: Princeton Architectural Press, 1993.
- CALTHORPE, P.; FULTON, W. *The regional city: Planning for the end of sprawl*. Washington: Island Press, 2001.
- CARPO, M. *The alphabet and the algorithm*. London: The MIT Press, 2011.
- CELANI, G. Algorithmic sustainable design: uma visão crítica do projeto generativo. *Resenhas Online*, v.10, n.116.03, 2011. Disponível em: <<http://www.vitruvius.com.br/revistas/read/drops/10.030/2109>>. Acesso em: 20 dez. 2011.
- CERVERO, R.; KOCKELMAN, K. Travel demand and the 3Ds: Density, diversity, and design. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, v.2, p.199-219, 1997.
- DITTMAR, H.; OHLAND, G. (Org.). *The new transit town: Best practices in Transit-Oriented Development*. Washington: Island Press, 2004.
- FARR, D. *Urbanismo sustentável: desenho urbano com a natureza*. Porto Alegre: Bookman, 2012.
- HILLIER, B.; HANSON, J. *The social logic of space*. Cambridge: Cambridge University Press, 1984.
- HOEK, J. The MXI (Mixed-use Index) as tool for urban planning and analysis. *Corporations and Cities: Envisioning corporate real estate in the urban future*, paper 3, 2008. Available from: <http://medewerkers.tudelft.nl/fileadmin/Faculteit/BK/Actueel/Symposia_en_congressen/CRE_2008/Papers/doc/Paper03_vandenHoek.pdf>. Cited: June 16, 2016.
- LEITE, C. *Cidades sustentáveis cidades inteligentes: desenvolvimento sustentável num planeta urbano*. Porto Alegre: Bookman, 2012.
- LIMA, F. *Métricas urbanas: sistema (para)métrico para análise e otimização de configurações urbanas de acordo com métricas de avaliação de desempenho*. 2017. 236f. Tese (Doutorado em Urbanismo) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017. f.20-203.
- LIMA, F. et al. Urbanmetrics: An algorithmic-(para)metric methodology for analysis and optimization of urban configurations In: GEERTMAN, S. et al. (Ed.). *Lecture notes in geoinformation and cartography*. New York: Springer International Publishing, 2017. p.47-64.
- PONT, M.; HAUPT, P. *Spacematrix: space, density and urban form*. Rotterdam: NAi Publishers, 2010.

FERNANDO TADEU DE ARAÚJO LIMA | ORCID iD: 0000-0001-7501-1466 | Universidade Federal de Juiz de Fora | Faculdade de Arquitetura e Urbanismo | Departamento de Projeto, Representação e Tecnologia | R. José Lourenço Kelmer, s/n., Campus Universitário, Martelos, 36036-900, Juiz de Fora, MG, Brasil | Correspondência para/Correspondence to: F.T.A. LIMA | E-mail: <fernando.lima@arquitetura.ufjf.br>.

NUNO MONTENEGRO | ORCID iD: 0000-0001-8520-7905 | Universidade de Lisboa | Centro de Investigação em Arquitectura, Urbanismo e Design | Faculdade de Arquitectura | Lisboa, Portugal.

RODRIGO CURY PARAIZO | ORCID iD: 0000-0002-2012-556X | Universidade Federal do Rio de Janeiro | Faculdade de Arquitetura e Urbanismo | Departamento de Análise e Representação da Forma | Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

JOSÉ RIPPER KÓS | ORCID iD: 0000-0002-4760-0017 | Universidade Federal de Santa Catarina | Faculdade de Arquitetura e Urbanismo | Departamento de Arquitetura e Urbanismo | Florianópolis, SC, Brasil.

ELABORAÇÃO

F.T.A. LIMA é autor da tese a que se refere o artigo e redator principal do texto; N. MONTENEGRO, co-orientador da pesquisa durante o período de doutoramento sanduíche em Lisboa, durante o ano de 2016; R.C. PARAÍZO, co-orientador da tese, redator e revisor do texto e J.R. KÓS orientador da tese, redator e revisor do texto.

Como citar este artigo/*How to cite this article*

LIMA, F.T.A. *et al.* *Citymetrics*: sistema (para)métrico para análise e otimização de configurações urbanas. *Oculum Ensaios*, v.16, n.2, p.409-427, 2019. <http://dx.doi.org/10.24220/2318-0919v16n2a4163>

Recebido em
15/2/2018 e
aprovado em
30/5/2018.