

## Otimização multi-objetivo e Desenvolvimento Orientado pelo Transporte: algoritmos evolutivos em estratégias de planejamento urbano

Multi-objective optimization and Transit Oriented Development: evolutionary algorithms in urban planning strategies

**Fernando Lima**

Universidade de Lisboa – Bolsista do CNPq  
fernando.lima@arquitetura.uff.br

**Jose Ripper Kos**

Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil  
josekos@ufrj.br

**Nuno Montenegro**

Universidade de Lisboa, Portugal  
nunomontenegro@fa.ulisboa.pt

### Abstract

This paper presents a computational approach to provide assessment and optimization of principles from Transit Oriented Development (TOD) - an urban development model that advocates compact, walkable, and mixed-use neighborhoods, centered around transport stations. In spite of being increasingly promoted around the world, TOD lacks an approach that addresses multivariate data for optimization of its principles. In this paper, we propose an algorithmic-parametric methodology, applied to a neighborhood unit in a case study. The objective is to demonstrate the potential of algorithmic approaches towards a more dynamic management of the large amount of data involved in DOT implementation methodologies.

**Keywords:** Transit Oriented Development; Multi-objective optimization; Urban planning.

### Introdução

A queima de combustível fósseis em veículos motorizados é responsável por até 75 por cento da poluição do ar urbano (Global Fuel Economy, 2016), enquanto a poluição do ar tem sido associada a 3,7 milhões de mortes prematuras em 2012 (Organização Mundial da Saúde, 2016). Para além de contribuir com as emissões de carbono, o paradigma adotado na organização de um número crescente de cidades tem sido responsável por inconvenientes nos centros urbanos contemporâneos (e. g. dependência do automóvel, padrões espaciais fragmentados, menores interações sociais). O Desenvolvimento Orientado pelo Transporte (DOT) é um modelo de desenvolvimento urbano que 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 espacial, que incentiva a criação de comunidades que não dependem exclusivamente do automóvel para os deslocamentos diários, está sendo crescentemente promovido em várias cidades do mundo como uma política sustentável (Calthorpe, 1993; Vale, 2015).

Embora não exista uma definição consensual para o DOT, ele é usualmente descrito de uma maneira física: uma área compacta com edifícios de uso misto, que conecta 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). Nesta lógica, necessidades urbanas básicas são facilmente acessíveis sem exigir automóveis ou dispende

grandes quantidades de tempo de deslocamento, suportando bairros mais autônomos e sustentáveis.

O DOT preconiza relações funcionais e de proximidade com os nós de transporte, visando o desenvolvimento de bairros que incentivam o uso de transporte público. A promoção de distritos em que se pode caminhar até as estações, e outros serviços urbanos, ocorre através da criação de áreas com urbanização compacta, diversidade no uso do solo e planejamento urbano orientado para o pedestre. Em outras palavras, o DOT visa territórios compactos e multifuncionais, onde os deslocamentos ocorram a pé ou de bicicleta, ou ainda, suportados por uma rede multimodal integrada de transportes coletivos. Os princípios primários do DOT consistem em: (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) 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) uso misto - diversidade de usos e funções dentro de um mesmo distrito, proporcionando maior autonomia para os bairros; (d) densidade - incentivar 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).

Neste sentido, é possível afirmar que o DOT se baseia em parâmetros mensuráveis para melhorar o desempenho de bairros e centros urbanos. Em outras palavras, 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., 2016).

Este artigo apresenta uma abordagem algorítmica para a avaliação e otimização de princípios do DOT, com base em uma metodologia orientada pela tríade princípio-índice-ferramenta. Isto é, para cada princípio considerado, existe um ou mais índices correspondentes e algoritmos de cálculo que permitem quantificar objetivamente e, por conseguinte, otimizar alternativas para configurações urbanas de uma área avaliada. Assim, a presente abordagem propõe a aplicação dos seguintes índices e seus respectivos algoritmos de cálculo:

(a) Índice de Proximidade à Estação (IPE) - um indicador que calcula o menor percurso possível entre uma estação de transporte e um (ou todos os) lote(s) de um bairro, com o objetivo de avaliar a acessibilidade ao transporte de uma localidade específica ou de todo um distrito; (b) Índice de Proximidade ao Serviço (IPS), de Diversidade de Serviços (IDS) e de Variedade de Serviços (IVS) - indicadores destinados a mensurar a caminhabilidade de uma determinada localidade ou bairro, por meio do cálculo dos menores percursos para se acessar diversos serviços urbanos, sua quantidade e distribuição no tecido urbano e a distância média para alcançá-los; (c) Índice de Uso Misto (IUM) Proposto por Hoek (2008), este indicador calcula a proporção entre áreas residenciais e não-residenciais de uma localidade, a fim de analisar a diversidade de um bairro. Estes índices destinam-se a apoiar estratégias de planejamento para DOT, uma vez que se destinam a medir e, consequentemente, otimizar a acessibilidade ao transporte, a caminhabilidade e a diversidade de áreas urbanas.

Neste contexto, o presente trabalho apresenta uma metodologia que emprega os índices acima citados, em tarefas de otimização que objetivam aperfeiçoar: (a) o posicionamento da estação de transporte de um determinado bairro, visando a otimização de sua acessibilidade ao transporte; (b) a localização / distribuição de serviços urbanos, com a intenção de minimizar distâncias e percursos, oferecendo maior caminhabilidade, e; (c) o equilíbrio entre residências e locais de trabalho, para a obtenção de uma maior diversidade no uso do solo. Além disso, é proposta ainda a incorporação dos indicadores de densidade Spacematrix, propostos por Pont & Haupt (2010), para suportar o processo de tomada de decisões, conforme explicitado a seguir.

## Metodologia

A abordagem metodológica proposta se desenvolve pela aplicação de algoritmos evolutivos para otimização multi-objetivo dos índices citados anteriormente. Pretende-se identificar e avaliar fragilidades em uma área urbana estudada, otimizando, simultaneamente, diversas funções objetivo (acessibilidade ao transporte, caminhabilidade e diversidade), no âmbito dos princípios do DOT. O objetivo

final é contribuir para a obtenção de um conjunto de soluções eficientes (Pareto-ótimas), ou seja, um conjunto de soluções pré-selecionadas a serem avaliadas pelos atores envolvidos nos processos de planejamento urbano. Deste modo, a metodologia proposta não se configura como dependente de um automatismo computacional, mas sim como um instrumento de recomendação. Também não se pretende aqui, conceber um sistema que inclua todas as variáveis envolvidas nos diferentes aspectos do DOT, mas desenvolver um conjunto de ferramentas que gerenciem dados e realizem cálculos complexos, suportando processos de tomada de decisão. As ferramentas em si não fornecem uma cidade melhor, mas objetivam permitir o cruzamento de informações relevantes, proporcionando soluções apoiadas por dados obtidos de uma maneira mais eficiente do que os meios tradicionais permitem. Neste contexto, o papel dos atores envolvidos no processo de planejamento urbano permanece central, uma vez que são estes atores que devem estipular objetivos, alimentar o sistema e considerar aspectos subjetivos e não-programáveis para eleger as soluções a serem adotadas.

Sendo assim, um conjunto de entidades geométricas foram associadas a elementos urbanos na construção de um modelo paramétrico, seguindo os seguintes critérios: (a) pontos representaram a localização dos edifícios e de diferentes funções urbanas (e. g. habitação, educação, comércio, alimentação, recreação, entre outros); (b) Curvas simularam a rede de ruas existente e; (c) polígonos foram usados para desempenhar o papel de edifícios. Estas entidades geométricas serviram então como *input* para as seguintes ferramentas algorítmicas, utilizadas na metodologia apresentada e elucidadas em sequência:

### Algoritmo para cálculo do Índice de Proximidade à Estação (IPE)

Esta ferramenta está diretamente relacionada ao conceito de acessibilidade ao transporte, uma vez que calcula as menores distâncias físicas entre uma estação e diversos destinos de uma área, considerando ainda, as inclinações nos trajetos. Por exemplo, se um determinado lote está a até 400m de distância de uma estação qualquer (5 min de caminhada), então lhe é atribuído o valor 1. À medida que a distância se aproxima de 1,6 km (20 minutos a pé) a pontuação diminui e um índice 0 é atribuído a distâncias maiores ou iguais a 1,6 km (ver tabela 1). O algoritmo também considera um fator de penalização para compensar o esforço necessário para percursos em aclive. 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 for de 400m, mas com uma inclinação de 10%, então o índice atribuído a este deslocamento sofre uma penalização de 10%, resultando em 0,9. A penalização aqui atribuída se dá proporcionalmente às inclinações em relação às distâncias, mas considerando o ambiente paramétrico no qual a ferramenta é utilizada, é possível adotar outros critérios de penalização.

**Tabela 1:** Valores de referência cálculo de proximidade

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

### Algoritmo para cálculo do Índice de Proximidade aos Serviços (IPS)

Este algoritmo funciona de maneira semelhante ao que calcula o IPE. No entanto, o IPS pretende estimar características da caminhabilidade de um determinado local e, para tal, calcula a menor distância de um determinado lote aos serviços mais próximos, considerando sete categorias (educacional, comercial, alimentação, recreação, entretenimento, saúde e serviços). O IPS adapta alguns critérios do índice Walkscore (Walkscore, 2015) e usa os mesmos critérios que o IPE para a atribuição de um índice para um lote. Entretanto, enquanto o IPE visa mensurar a proximidade de um lote para uma estação, o IPS considera as distâncias (e suas inclinações) deste mesmo lote ao serviço mais próximo. A Figura 1 ilustra a lógica neste algoritmo:



**Figura 1:** Lógica do cálculo do IPS: o algoritmo calcula o serviço mais próximo e mensura a proximidade de um determinado lote com base nesta distância.

### Algoritmo para cálculo do Índice de Diversidade dos Serviços (IDS)

O algoritmo para cálculo do IDS visa mensurar um outro aspecto importante para a avaliação da caminhabilidade de um determinado local: a diversidade de serviços que um determinado lote possui em suas imediações. Neste sentido, esta ferramenta visa calcular a média das distâncias entre um determinado local e todos os serviços próximos a ele. Enquanto o IPS considera a distância para o serviço mais próximo, o IDS atribui um valor considerando a distância média entre todos os serviços em uma categoria e o lote em questão. Assim, enquanto o IPS mensura a distância do serviço mais próximo a uma localidade, o IDS considera as distâncias entre esta mesma localidade e todos os serviços contidos em uma mesma categoria, conforme demonstra a Figura 2.



**Figura 2:** Base de cálculo do IDS: o algoritmo considera a distância média para todos os serviços para estabelecer sua pontuação.

### Algoritmo para cálculo do Índice de Variedade dos Serviços (IVS)

O algoritmo para cálculo do IVS trabalha de maneira complementar aos índices anteriores. Enquanto os IPS e IDS consideram a distância para o serviço mais próximo e a distância média para todos os serviços, respectivamente, o IVS se dá pelo cálculo da proporção entre o número de serviços de uma determinada categoria e o número total de localidades da área analisada. Este índice, cuja operação básica é efetuar a contagem de serviços dentro de um raio de 20 min 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.

### Algoritmo para cálculo do Índice Uso Misto (MXI)

Este algoritmo procura medir objetivamente a diversidade de um bairro. 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 um bairro, realizando uma comparação destas proporções, como 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. Hoek (2008)

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

### Algoritmos para cálculo dos Indicadores Spacematrix

Este conjunto de algoritmos calculam os indicadores de densidade *Spacematrix*, propostos por Pont & Haupt (2010). O conceito de *Spacematrix* defende uma abordagem de múltiplas variáveis para medição de densidade, que consiste em três indicadores fundamentais: Intensidade (FSI),

Cobertura (GSI) e Densidade da rede (N). FSI reflete a intensidade de construção, GSI demonstra a relação entre espaços construídos e não construídos e N refere-se à concentração de redes em um dado tecido. Os indicadores de Spacematrix são instrumentos dinâmicos para fornecer avaliações objetivas das questões de densidade (neste caso particular na escala do bairro) para uma unidade de vizinhança orientada pelo DOT.

### Otimização multi-objetivo

A Otimização multi-objetivo gerencia um conjunto de funções-objetivos a serem otimizados (maximizados ou minimizados). É um recurso de suporte multicritério para tomada de decisões, que considera a otimização matemática 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 multi-objetivo, 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 alguns dos outros valores objetivos. Enquanto não há nenhuma informação adicional subjetiva, todas as soluções ótimas de Pareto são considerados igualmente boas.

A otimização multi-objetivo pode ser aplicada em muitas situações, onde decisões ideais precisam ser tomadas em um contexto de conflito entre dois ou mais objetivos diferentes. No contexto da metodologia proposta, a otimização de multi-objetivo é essencial para a obtenção de soluções que envolvem objetivos conflitantes, relacionados aos diversos índices empregados.

### Sequência Metodológica da abordagem

Conforme afirmado anteriormente, a abordagem proposta baseia-se em uma lógica de avaliação e otimização de parâmetros que se relacionam com princípios relevantes do DOT, visando uma metodologia de suporte a processos de planejamento. Neste contexto, a metodologia aqui apresentada pressupõe: (a) a elaboração de um modelo paramétrico da área a ser analisada em ambiente Rhinoceros/Grasshopper onde ocorrem as operações de simulação, análise e otimização e (b) a utilização do add-on *Octopus*, para aplicação de algoritmos evolutivos para a otimização multi-objetivo.

Assim, o conjunto de ferramentas apresentadas anteriormente, utilizam os dados da área de análise, emulados por entidades geométricas como *input* para a formulação de uma sequência de operações algorítmicas, como segue: (a) mensurar a acessibilidade ao transporte, a caminhabilidade, a diversidade e a densidade do bairro de estudo, por meio dos respectivos índices e algoritmos de cálculo apresentados, de maneira a permitir a identificação de demandas de intervenção; (b) identificar qual o posicionamento ótimo para a estação, ou seja, aquele que promove a menor distância média para todos os lotes, aumentando o Índice de Proximidade à Estação e sugerindo

maior acessibilidade ao transporte; (c) identificar onde novos serviços urbanos devem ser inseridos, visando um aumento nos índices de proximidade, diversidade e variedade e, Índice de Caminhada o que, conseqüentemente, sugere maior caminhabilidade; (d) avaliar diferentes cenários de ocupação para lotes e áreas vagas, por meio do cálculo automático da relação entre áreas residenciais e não residenciais, a fim de promover um índice de uso misto mais equilibrado e uma maior diversidade para o bairro; (e) avaliar as soluções propostas por meio dos indicadores *Spacematrix*, comparando cenários antes e depois das intervenções, de maneira a identificar limitações ou potencialidades de densidades dentro escopo do DOT.

A Figura 3 ilustra o fluxo de trabalho da metodologia proposta:

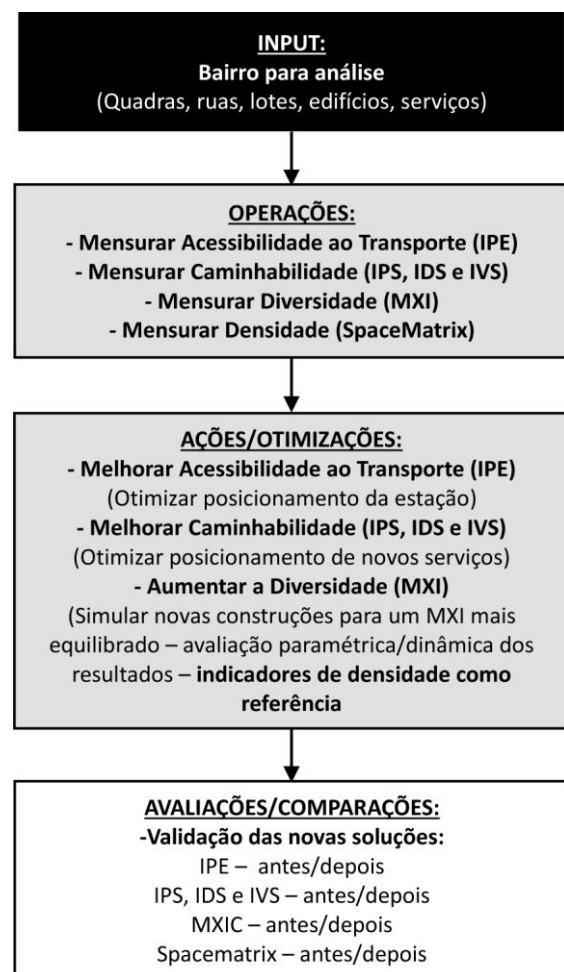


Figura 3: Sequência de etapas da metodologia empregada.

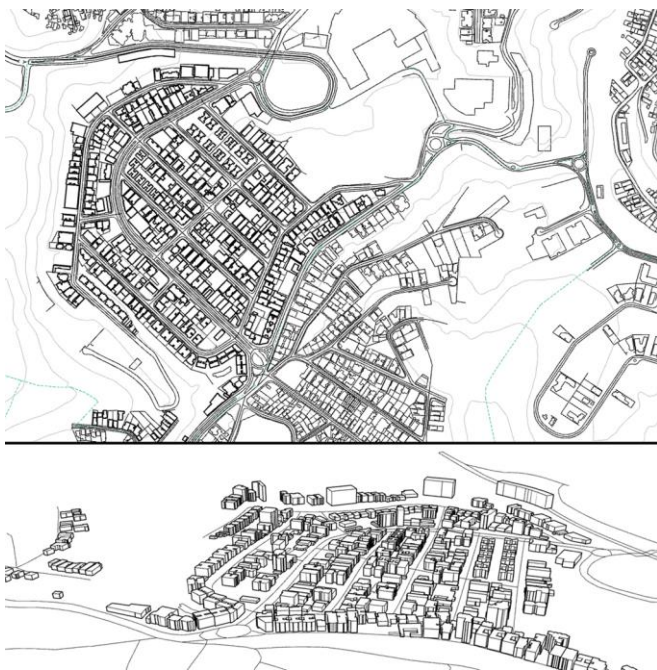
## O Caso de estudo

O caso de estudo utilizado nesta investigação consiste na aplicação da metodologia proposta em um bairro existente, mais especificamente, no bairro Cascatinha, localizado na



cidade de Juiz de Fora, Brasil (ver figura 4). O principal objetivo deste estudo é o de avaliar o potencial da metodologia proposta em adequar uma área urbana aos princípios e características do DOT.

Apesar de ser predominantemente residencial, o bairro escolhido possui grande potencial para ser mais autônomo e sustentável, apresentando algumas características que o credenciam como uma amostra adequada para avaliação da metodologia proposta, tais como: (a) extensão adequada para implementação do DOT (aprox. 1 km de diâmetro); (b) densidade relativamente baixa; (c) nenhuma estação de transporte; (d) complexidade topográfica; (e) áreas disponíveis para novas construções; (f) existência de serviços relevantes, como um parque, um hospital, uma universidade e um centro comercial, entre outros, na proximidade do bairro; (g) proximidade do centro da cidade, e; (h) uma boa colocação na rede urbana, ligando diretamente o centro da cidade com outras regiões do município. Estes aspectos conferem um cenário adequado para avaliar a metodologia proposta, pois, além de demonstrar os problemas típicos do modelo de cidade espalhada, uma situação encontrada em várias cidades em todo o mundo, também apresenta algumas importantes características para avaliar a implementação da metodologia.



**Figura 4:** Imagens do modelo do bairro estudado.

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 pelos índices IPS, IDS e IVS, com o

objetivo de medir, respectivamente, a proximidade, a diversidade e variedade dos serviços no bairro; (c) as áreas disponíveis para novas construções (lotes vagos e construções não-consolidadas), visando proporcionar espaço para a proposição de novas construções que possam incrementar a diversidade da área; (e) o desenho topográfico das ruas do bairro, com vistas a considerar trajetos, distâncias e inclinações para cálculos de proximidade, e: (f) o desenho de quadras e lotes, de modo a proporcionar a avaliação da densidade por meio dos indicadores Spacematrix.

A partir daí, a tarefa foi aplicar as operações de simulação e otimização, com o objetivo de aumentar 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) inserir um novo serviço para cada categoria, buscando aumentar os índices de caminhabilidade com o menor número de novos serviços possível; (c) avaliar diferentes estratégias de ocupação para terrenos baldios, considerando índice de uso misto e os indicadores Spacematrix para ajudar na análise dos impactos das soluções propostas.

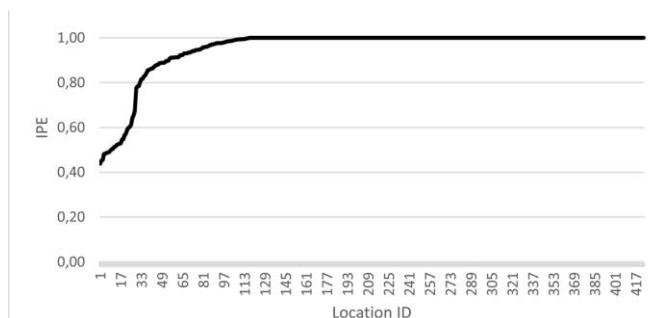
## Resultados

A implementação da metodologia proposta indicou a necessidade de se proceder a algumas modificações na configuração do bairro, no sentido de melhor desempenho no âmbito dos princípios DOT. Em resumo, as novas configurações, indicam um potencial para: (a) uma excelente acessibilidade ao transporte, uma vez que a inserção otimizada da estação de transporte resultou em uma elevada pontuação média do IPE (ver Tabela 3 e Figura 5); (b) uma maior caminhabilidade, uma vez que a adição otimizada de novos serviços proporcionou um aumento dos índices IPS, IDS e IVS, em todas as categorias analisadas, como mostrado na Tabela 3 e nas figuras 6, 7 e 8; (c) um bairro com maior diversidade, uma vez que a proposição de novos edifícios e serviços resultaram em um índice de uso misto (MXI) mais equilibrado, sugerindo um maior equilíbrio entre áreas residenciais e não residenciais - ver tabela 3; (d) uma densidade mais adequada para um bairro DOT, pois geometrias urbanas parametricamente controladas possibilitaram regular a densidade, de maneira a suportar mais pessoas (habitando ou trabalhando) mais perto do nó de transporte, como mostra a tabela 3:

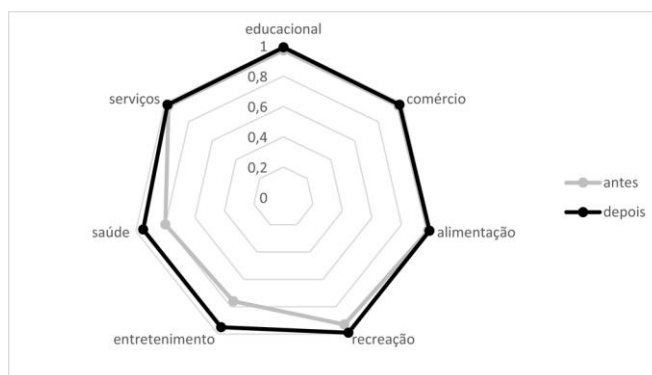
**Tabela 3:** Dados gerais do caso de estudo, antes e após a otimização.

Acessibilidade ao Transporte		
IPE	Antes	Depois
Média	0	0,95
Menor	0	0,44
Maior	0	1
Caminhabilidade - Parcial		
Educação	Antes	Depois
IPS (médio)	0,97	0,99
IDS (médio)	0,66	0,69

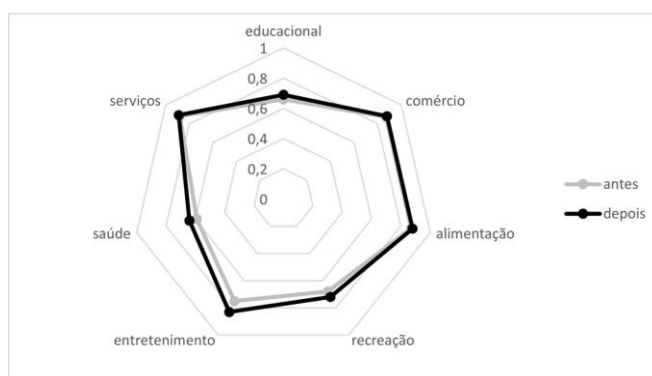
IVS (médio)	0,03	0,03
<b>Comércio</b>	<b>Antes</b>	<b>Depois</b>
IPS (médio)	0,97	0,98
IDS (médio)	0,87	0,88
IVS (médio)	0,04	0,05
<b>Alimentação</b>	<b>Antes</b>	<b>Depois</b>
IPS (médio)	0,98	0,99
IDS (médio)	0,87	0,88
IVS (médio)	0,06	0,07
<b>Recreação</b>	<b>Antes</b>	<b>Depois</b>
IPS (médio)	0,93	0,99
IDS (médio)	0,68	0,72
IVS (médio)	0,02	0,02
<b>Entretenimento</b>	<b>Antes</b>	<b>Depois</b>
IPS (médio)	0,76	0,95
IDS (médio)	0,75	0,83
IVS (médio)	0,00	0,01
<b>Saúde</b>	<b>Antes</b>	<b>Depois</b>
IPS (médio)	0,8	0,95
IDS (médio)	0,59	0,64
IVS (médio)	0,02	0,02
<b>Serviços</b>	<b>Antes</b>	<b>Depois</b>
IPS (médio)	0,97	0,98
IDS (médio)	0,88	0,89
IVS (médio)	0,03	0,03
<b>Caminhabilidade - Global</b>		
<b>Índices Globais</b>	<b>Antes</b>	<b>Depois</b>
IPS (médio)	0,91	0,98
IDS (médio)	0,76	0,79
IVS (médio)	0,03	0,03
<b>Diversidade e Densidade</b>		
<b>Indicadores</b>	<b>Antes</b>	<b>Depois</b>
MXI	80/20	62/38
FSI	0,49	0,64
GSI	0,15	0,17
N	0,013	0,013



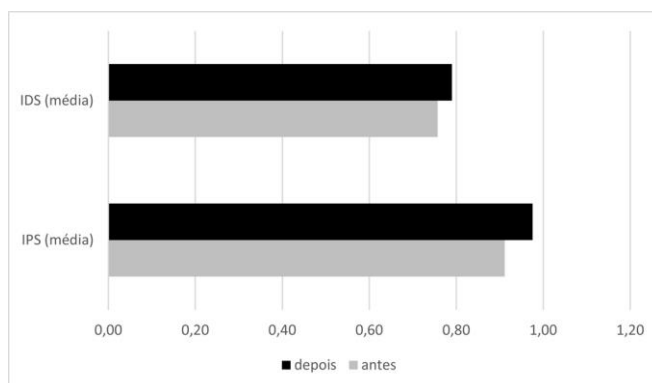
**Figura 5:** Gráfico de IPE. Valores menores que 0.5 não são desejáveis.



**Figura 6:** Valores parciais (por categoria) para IPS antes e depois das otimizações.



**Figura 7:** Valores parciais (por categoria) para IDS antes e depois das otimizações.



**Figura 8:** Valores globais para IDS e IPS antes e depois das otimizações.

## Discussão e Conclusões

A metodologia implementada nesta investigação provou ser útil no contexto da análise, avaliação e otimização dos princípios derivados do DOT na área estudada. O posicionamento da estação foi apoiado por operações de otimização que permitiram identificar, entre centenas de opções, a solução que oferece a menor distância média para todos os outros lotes, considerando as inclinações nos trajetos. Neste sentido, o IPE obtido foi o mais alto possível, considerando a configuração do bairro e a limitação de apenas uma estação. Além disso, os locais com IPE mais

baixos foram facilmente identificáveis, o que consideramos ser um bom ponto de partida para futuras ações de melhoria em áreas urbanas com problemas semelhantes (a adoção de modais secundários para conectar esses locais e a estação, por exemplo). A otimização multi-objetivo abordou simultaneamente vários critérios conflitantes para soluções, cruzando dados e executando cálculos que seriam mais difíceis de executar por meios tradicionais. Enquanto índices de proximidade consideraram apenas as instalações mais próximas, índices de diversidade avaliaram todos os serviços ao redor, visando um maior equilíbrio de posicionamento. Este cenário de *trade-off* foi fundamental para a obtenção de melhores índices de proximidade, diversidade e variedade, o que significa dizer que os serviços estão mais próximos, melhor distribuídos e em maiores quantidades ao longo do bairro, sugerindo melhor caminhabilidade. Estes componentes possuem potencial para desempenhar um importante papel nas tarefas de planejamento de DOT, uma vez que permitem identificar quais serviços estão mais ou menos disponíveis para um lote, rua, quadra ou até mesmo todo o bairro. Por outro lado, também permitem visualizar quais áreas do bairro são melhor ou pior atendidas em relação às diferentes categorias.

A otimização multi-objetivo forneceu um conjunto de soluções que se devem ser considerados igualmente adequadas (soluções Pareto-ótimas). Esta é uma possibilidade importante para processos de planejamento urbano, uma vez que permite considerar aspectos "não programáveis" para a estipulação de critérios e prioridades para a tomada de decisão.

Apesar de não serem diretamente otimizados, os indicadores de densidade desempenham um papel importante nesta abordagem, uma vez que permitem a visualização e avaliação de diferentes cenários para ocupação de áreas vagas, orientando intervenções e sugerindo diferentes hipóteses de potencial construtivo e distribuição de usos. O índice de uso misto e os indicadores Spacematrix se mostraram úteis na execução algorítmica desta abordagem, dado que consideram aspectos objetivos para medir a diversidade e densidade, respectivamente.

### Limitações, desenvolvimentos futuros e considerações finais

Apesar da utilidade de um conjunto de ferramentas de simulação, avaliação e otimização para suporte a processos de planejamento urbano orientados pelo DOT, é possível identificar algumas limitações na abordagem apresentada. Primeiramente, os autores reconhecem que os índices propostos, que visam mensurar a caminhabilidade, não incorporam, ainda, as diversas características que podem influenciar a caminhabilidade de uma área urbana. Neste sentido, outras variáveis podem vir a ser testadas - que permitam aferir a conectividade e a densidade da rede de ruas, por exemplo. Em segundo lugar, percebe-se a importância de formular instrumentos que permitam identificar quais ruas ou trajetos possuem maior recorrência nos caminhos dos pedestres, permitindo definir locais de alta prioridade para promover a caminhabilidade e o uso misto mais intensificado. Em terceiro lugar, variáveis relacionadas com a densidade populacional e a implementação de modais em um bairro também devem ser testados, a fim de dar

suporte a implementação de diferentes modais com base no número de pessoas que circulam, trabalham e residem na vizinhança. Finalmente, considerando a influência de percursos com maior ou menor inclinação nos cálculos dos índices propostos, é importante incorporar estudos com orientações mais específicas para o cálculo das penalidades por alicive.

Este artigo visa contribuir para a gestão de soluções nos processos de planejamento DOT, a fim de delinear um ponto de partida para abordagens mais eficientes em relação às propostas computacionais neste contexto. Neste sentido, este estudo pretende demonstrar o potencial de abordagens algorítmicas para um gerenciamento mais dinâmico da grande quantidade de dados envolvida em metodologias de implementação do DOT mais eficientes.

## Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), ao Centro de Investigação em Arquitectura, Urbanismo e Design (CIAUD) da Universidade de Lisboa e ao Programa de Pós-Graduação em Urbanismo (PROURB) da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), por apoiar a investigação e a apresentação deste trabalho.

## Referências

- Calthorpe, P. (1993). *The Next American Metropolis: Ecology, Community and the American Dream*, Nova York: Princeton Architectural Press.
- Calthorpe, P. and Fulton, W. (2001). *The regional city: planning for the end of sprawl*. Washington: Island Press.
- Cervero, R. and Kockelman, K. (1997). Travel demand and the 3Ds: density, diversity, and design. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2, 199-219.
- Dittmar, H. and Ohland, G. (2004). *The new transit town: Best practices in transit-oriented development*. Washington: Island Press.
- Global Fuel Economy. Retrieved from <http://www.globalfuelconomy.org/>
- Hoek, J. (2008). The MXI (Mixed use Index). An instrument for anti-sprawl policy?. *Proceedings of the 44<sup>th</sup> ISOCARP congress* 2008.
- Lima, F., Kos, J. and Paraizo, R. (2016). Algorithmic approach toward Transit-Oriented Development neighborhoods: (Para)metric tools for evaluating and proposing rapid transit-based districts. *International Journal of Architectural Computing*, 14(2), 131-146.
- Organização Mundial da Saúde. Retrieved from: <http://www.who.int/mediacentre/news/releases/2014/airpollution/en/>
- Pont, M. and Haupt, P. (2010). *Spacematrix: Space, Density and Urban Form*. Rotterdam: NAI Publishers.
- Suzuki, H., Cervero, R. and Iuchi, K. (2013). *Transforming cities with transit: Transit and land-use integration for sustainable urban development*. Washington: Word Bank.
- Vale, D. (2015). 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, 45, 70-80. Walkscore. Retrieved from: <http://www.walkscore.com>