

OTIMIZAÇÃO NA INSTALAÇÃO DE SISTEMA DE BICICLETAS COMPARTILHADAS PARA A CIDADE UNIVERSITÁRIA DA UFRJ

Gregório Costa Luz de Souza Lima

Programa de Engenharia de Transportes – PET/COPPE - Universidade Federal do Rio de Janeiro
Centro de Estudos em Regulação e Infraestrutura - Fundação Getúlio Vargas

Gabriel Terra de Oliveira

Programa de Engenharia de Produção – PEP/COPPE
Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ

Laura Bahiense

Programa de Engenharia de Sistemas e Computação– PESC/COPPE
Programa de Engenharia de Transportes– PET/COPPE
Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ

RESUMO

Este trabalho tem por objetivo verificar a capacidade de utilização de modelos e técnicas de programação linear para otimizar o atendimento aos usuários e a alocação de recursos no dimensionamento de sistemas de bicicletas compartilhadas. Utilizou-se o como estudo de caso a Ilha do Fundão, na cidade do Rio de Janeiro, onde está localizado o campus Cidade Universitária da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). A partir da revisão bibliográfica, foram identificados dois potenciais modelos a serem aplicados: o de localização por cobertura e o de localização de máxima cobertura. Foram desenvolvidos dois cenários para cada modelo e o sistema de bicicletas foi dimensionado baseado em um dos cenários. Concluiu-se que os problemas de localização são úteis para o dimensionamento e alocação de estações em sistemas públicos de bicicletas compartilhadas. Apesar de ambos se mostrarem eficazes, o modelo de localização de máxima cobertura se mostrou mais próximo à realidade ao considerar dados de demanda e número máximo de estações de bicicletas a serem instaladas.

ABSTRACT

This work aims to verify the usage of linear programming models and techniques to optimize the service to users and the allocation of resources in the design of shared bicycle systems. The case study chosen was the “Ilha do Fundão” in the city of Rio de Janeiro, where the “Cidade Universitária” campus of the Federal University of Rio de Janeiro (UFRJ) is located. From the bibliographic review, two potential models were identified: the covering location and maximal covering location. Two scenarios were developed for each model, and the bike sharing system was designed based on one of the scenarios. We conclude that location problems are useful for designing and allocating stations in public bike sharing systems. Although both were effective, the maximal covering location model is closer to reality since it considers demand data and maximum number of bike stations to be installed.

1. INTRODUÇÃO

Sistemas de compartilhamento de bicicletas estão sendo implementados cada vez mais nas cidades ao redor do mundo. De acordo com o TheCityFixBrasil (2015), em 2004 haviam apenas treze sistemas de bicicletas instaladas no mundo. Uma década depois, oitocentos e cinquenta e cinco sistemas já haviam sido instalados, sendo a China (237), Itália (114) e Espanha (113) os países com mais sistemas.

Segundo Finger *et al.* (2017), as principais vantagens dos sistemas de bicicletas compartilhadas são a sua flexibilidade de implantação, uso, ampliação e adaptabilidade, aumento das atividades físicas pelos usuários (reduzindo índices de obesidade), redução nos congestionamentos e redução da emissão de gases do efeito estufa e ruídos. Além disso, segundo Lima (2018), em regiões em desenvolvimento, como as metrópoles brasileiras, a utilização da bicicleta compartilhada cumpre o papel de integração com o transporte público em locais onde não há linhas de ônibus alimentadoras.

Neste sentido, este trabalho tem por objetivo verificar a capacidade de utilização de modelos e técnicas de programação linear para otimizar o número de estações de bicicletas, bem como

sua localização, no atendimento aos usuários de sistemas de bicicletas compartilhadas. Utilizou-se como estudo de caso a Ilha do Fundão, na cidade do Rio de Janeiro, onde está localizado o campus Cidade Universitária da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ).

As informações de demanda utilizadas no estudo de caso foram baseadas na Pesquisa O/D realizada por ITDP (2014), que estimou que a população do corpo social da UFRJ seria de 96 mil pessoas. Os dados de distância entre os possíveis pontos de instalação das estações de bicicletas foram levantados através da ferramenta web Google Maps. A alocação das estações de bicicletas baseou-se em uma categoria de problemas clássicos da programação linear: problema de localização de facilidades. Quatro cenários baseados nos métodos identificados na revisão bibliográfica foram montados e uma análise de sensibilidade foi utilizada para construir curvas que refletem os níveis de compromisso entre a população coberta (demanda atendida) e o número de facilidades localizadas, considerando o modelo de máxima cobertura. Por fim, o sistema de bicicletas foi dimensionado baseado em um dos quatro cenários anteriormente apresentados.

O trabalho divide-se em cinco seções, da seguinte maneira: a primeira se constitui dessa introdução, a segunda é destinada à revisão bibliográfica sobre modelos de localização de facilidades, a terceira descreve os modelos matemáticos utilizados neste trabalho para a localização e o dimensionamento do sistema de bicicletas compartilhadas, a quarta apresenta os resultados computacionais obtidos e, finalmente, na quinta seção são tecidas as considerações finais do trabalho.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os problemas de localização de facilidades são muito estudados na área de Pesquisa Operacional. Pizzolato e Rozental (2009) definem o problema de localizar uma facilidade como a escolha de uma posição geográfica para sua operação de forma a maximizar uma medida de utilidade, satisfazendo diversas restrições, em particular restrições de demanda.

Segundo Mapa e Lima (2012), as aplicações de problemas de localização de facilidades têm como objetivos comuns: aumentar a proximidade da demanda e, assim, reduzir os custos de transporte; maximizar a área coberta; melhorar o nível de acessibilidade dos clientes; reduzir o custo com instalações; dentre outros.

Os setores público e privado se diferenciam na forma como formulam os objetivos e restrições dos problemas de localização de facilidades. Conforme Revelle *et al.* (1970), a decisão no setor privado envolve, de forma geral, a minimização dos custos de instalação e operação e/ou a maximização do lucro com a utilização. Por outro lado, a decisão no setor público visa, usualmente, a maximização da satisfação dos usuários (a sociedade em geral) e a minimização dos custos de instalação e operação.

De acordo com Galvão *et al.* (2003), os problemas de localização no setor público podem ser classificados em duas categorias: localização de serviços não emergenciais (ex: escolas, aterros sanitários, agências de correio, etc.) e localização de serviços emergenciais (ex: hospitais, bombeiros, unidades de pronto atendimento, etc.).

Lima (2003) destaca, ainda, que as medidas de eficiência para otimização em cada um dos casos são diferentes. Para localização de serviços não emergenciais, considera-se a distância média percorrida ou o tempo médio despendido pelo usuário no trajeto. Já para os serviços emergenciais, avalia-se a abrangência máxima do equipamento coletivo, isto é, a máxima distância a ser percorrida ou o máximo tempo de viagem a ser gasto entre qualquer usuário do sistema e o equipamento mais próximo.

Segundo Goudard *et al.* (2014), entre os modelos de localização mais difundidos para instalações não emergenciais que se encontram amplamente difundidos na literatura estão: p-medianas, localização por cobertura e localização de máxima cobertura.

O modelo de p-medianas consiste em localizar p facilidades (número de instalações) minimizando-se a soma das distâncias de cada ponto de demanda à sua mediana mais próxima. Cada mediana equivale a um centro de gravidade que minimiza a distância demanda-oferta. Nesse tipo de modelo, cada indivíduo é atendido por apenas uma instalação.

O modelo de localização por cobertura tem como objetivo minimizar o número de instalações de modo que todos os pontos de demanda sejam cobertos, não importando se a população é grande ou pequena, a distância máxima entre os nós da rede, ou quão pequena ou grande seja a necessidade dos serviços.

Já que os recursos necessários para cobrir toda a população podem ser excessivos, Church e Reville (1974), apresentaram um problema que não requer cobertura de todos os usuários, chamado problema de localização de cobertura máxima. Este modelo fixa o número p de facilidades a serem instaladas e esse número pode ser insuficiente para cobrir toda a população dentro do padrão de cobertura pré-estabelecido. Nesse modelo, o objetivo é maximizar a população coberta dentro do padrão de cobertura pré-estabelecido.

Nesse trabalho, os modelos de localização por cobertura e de localização de máxima cobertura foram utilizados para otimizar o número de estações de bicicletas, bem como sua localização, no atendimento aos usuários de sistemas de bicicletas compartilhadas.

O modelo de p-medianas não foi utilizado devido à sua limitação de não considerar a distância máxima percorrida pelo usuário até a facilidade. Além disso, este modelo limita o atendimento de cada indivíduo por apenas uma facilidade, o que não corresponde à realidade de um sistema de bicicletas compartilhadas.

3. MODELOS MATEMÁTICOS

Por se tratar de um equipamento público não emergencial, têm-se como objetivos maximizar os benefícios à população e minimizar os custos de instalação. Para maximizar os benefícios, deve-se melhorar o nível de acessibilidade dos usuários às instalações, ou seja, estabelecer uma distância máxima aceitável para os usuários caminharem até a estação de bicicletas. Para minimizar os custos, estabeleceu-se uma quantidade máxima de estações a serem instaladas de forma a maximizar o atendimento da demanda.

As próximas seções apresentam os modelos matemáticos de localização por cobertura e de localização de máxima cobertura utilizados, estes baseados em Drezner (1995).

1.1. Problema de localização por cobertura

O objetivo do problema de localização por cobertura é minimizar o número de estações de bicicletas na Cidade Universitária de modo a cobrir o atendimento à demanda dos edifícios do campus a uma distância máxima pré-determinada. As estações de bicicletas podem ser instaladas em qualquer um dos edifícios.

Sendo n tanto o número de localizações possíveis quanto o de edifícios a serem atendidos, d_{ij} as distâncias entre os edifícios, e d a distância máxima de caminhada até uma estação de bicicletas, o modelo de localização por cobertura pode ser modelado como:

$$\text{Min } \sum_{j=1}^n x_j \quad (3.1.1)$$

$$\text{sujeito a } \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \geq 1, \quad i = 1, \dots, n \quad (3.1.2)$$

$$x_j \in \{0,1\}, j = 1, \dots, n \quad (3.1.3)$$

$$\text{em que } a_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{se } d_{ij} \leq d; \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

As variáveis de decisão $x_j \in \{0,1\}$, $j = 1, \dots, n$ indicam, para cada possível ponto de instalação j , se uma estação será instalada em j ($x_j = 1$) ou não ($x_j = 0$). A função objetivo (3.1.1) visa minimizar o número de estações de bicicletas a serem instaladas. As restrições (3.1.2) impõem que cada usuário deve ser coberto (atendido) por pelo menos uma estação. Por fim, (3.1.3) trata da integralidade das variáveis de decisão.

1.2. Problema de máxima cobertura

O objetivo do problema de localização de máxima cobertura consiste em localizar um certo número de estações de bicicletas na Cidade Universitária de modo a maximizar a demanda que pode ser atendida até um determinado raio de cobertura. Mais uma vez, as estações de bicicletas podem ser instaladas em qualquer um dos edifícios.

Sendo n tanto o número de localizações possíveis quanto o de edifícios a serem atendidos, d_{ij} as distâncias entre os edifícios, d a distância máxima de caminhada até uma estação de bicicletas, p o número de estações de bicicletas a serem instaladas, e f_i a demanda de cada edifício, o modelo de máxima cobertura pode ser modelado como:

$$\text{Max } \sum_{i=1}^n f_i y_i \quad (3.2.1)$$

$$\text{sujeito a } \sum_{j \in N_i} x_j \geq y_i, i = 1, \dots, n \quad (3.2.2)$$

$$\sum_{j=1}^n x_j = p \quad (3.2.3)$$

$$x_j \in \{0,1\}, j = 1, \dots, n \quad (3.2.4)$$

$$y_i \in \{0,1\}, i = 1, \dots, n \quad (3.2.5)$$

em que $N_i = \{j | d_{ij} \leq d\}$ é o conjunto de facilidades que satisfazem o padrão de cobertura pré-estabelecido, ou seja, que estão a menos de uma distância d do ponto de demanda i .

As variáveis de decisão $x_j \in \{0,1\}$, $j = 1, \dots, n$ indicam, para cada possível ponto de instalação j , se uma estação será instalada em j ($x_j = 1$) ou não ($x_j = 0$). As variáveis de decisão $y_i \in \{0,1\}$, $i = 1, \dots, n$ indicam, para ponto de demanda i , se ele será coberto ($y_i = 1$) ou não ($y_i = 0$) pelo padrão de cobertura pré-estabelecido. A função objetivo (3.2.1) maximiza a soma das demandas cobertas. A restrição (3.2.2) impõe que a demanda i só pode ser coberta se houver pelo menos uma facilidade localizada dentro do padrão de cobertura. A restrição (3.2.3) fixa em p o número de estações de bicicletas a serem localizadas.

Essa formulação pode ser utilizada para construir curvas que refletem os níveis de compromisso entre a população coberta (demanda atendida) e o número de facilidades localizadas, conforme será visto mais à frente, na seção 4.3.

4. EXPERIMENTOS COMPUTACIONAIS

Essa seção é dividida em quatro subseções. Em 4.1, são apresentados os dados de entrada utilizados nos modelos matemáticos descritos na seção anterior. Em 4.2, relata-se a aplicação dos modelos e dados em forma de quatro cenários e os resultados computacionais obtidos. Em 4.3, realiza-se uma análise de sensibilidade a partir do modelo de máxima cobertura. Por fim, a subseção 4.4 é dedicada ao dimensionamento do sistema de bicicletas baseando-se em um

dos quatro cenários apresentados na subseção 4.2.

1.3. Dados de entrada

Para aplicação dos modelos descritos na seção 3, utilizou-se uma matriz de distâncias entre os vinte e dois edifícios da Cidade Universitária passíveis de serem selecionados para instalação das estações de bicicletas. Essa matriz foi produzida através do levantamento das referidas distâncias entre os edifícios na ferramenta web Google Maps.

Os edifícios que compõem o estudo de caso e suas respectivas numerações são:

1. Centro de Ciências Matemáticas e da Natureza (CCMN);
2. Centro de Ciências da Saúde (CCS);
3. Centro de Pesquisas e Desenvolvimento Leopoldo Américo Miguez de Melo (CENPES);
4. Centro de Tecnologia Mineral (CETEM);
5. Instituto de Pós-Graduação e Pesquisa em Administração da Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPEAD);
6. Centro de Tecnologia (CT);
7. Centro de Tecnologia 2 (CT2);
8. Escola de Educação Física e Desportos (EEFD);
9. Hospital Universitário Clementino Fraga Filho (HUCFF);
10. Faculdade de Letras (LETRAS);
11. Parque Tecnológico;
12. Prefeitura Universitária;
13. Reitoria;
14. Estação Fundão (BRT TransCarioca);
15. Vila Residencial;
16. Alojamento dos Estudantes;
17. Bio Rio;
18. Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL);
19. CENPES II;
20. LabOceano;
21. Instituto de Puericultura e Pediatria Martagão Gesteira (IPPMG); e
22. Instituto de Engenharia Nuclear (IEN).

De acordo com o ITDP (2014), a população do corpo social da UFRJ seria de aproximadamente 96 mil pessoas, as quais circulariam diariamente nas dependências da Universidade. Em linha com o critério estabelecido pelo Guia para estudos de implantação de sistemas de bicicletas compartilhadas desenvolvido pelo ITDP (2014), que recomenda de 10 a 30 bicicletas para cada 1000 habitantes, ter-se-ia um número entre 960 e 2880 bicicletas em operação para atender a essa população.

Segundo pesquisa O/D apresentada pelo ITDP (2014), 63,48% das pessoas declararam que utilizariam um sistema de empréstimo de bicicletas gratuito para circulação interna na Ilha do Fundão. Portanto, a demanda potencial para o dimensionamento do sistema de bicicletas compartilhadas foi de 60.940 usuários. Para tal população, ainda segundo os critérios do Guia, chegar-se-ia ao mínimo aproximado de 600 bicicletas.

É importante ressaltar, contudo, que grande parte da população da Cidade Universitária é flutuante, ou seja, passa apenas parte do dia no local. Esta característica tende a reduzir a demanda por bicicletas quando comparada a áreas urbanas com usos residenciais e comerciais – nas quais estão baseadas as diretrizes do Guia (ITDP, 2014).

Assim, com o objetivo de evitar um superdimensionamento do sistema, definiu-se a implantação de 400 bicicletas.

1.4. Aplicação dos modelos e resultados

Para desenvolvimento e aplicação dos modelos matemáticos foram empregados a linguagem FICO® *Xpress Mosel* e o software FICO® *Xpress IVE Version 1.24.22 64 bits*. Utilizou-se um computador Intel® Core™ i7-6500U CPU @ 2.50 GHz 2.60 GHz com 16,0 GB de memória RAM instalada e sistema operacional Windows 10 de 64 bits.

Baseados nos métodos matemáticos de resolução, foram desenvolvidos quatro cenários. Para aplicação do modelo de localização por cobertura foram definidas duas distâncias limites de caminhada para os usuários: 600 e 800 metros (aproximadamente 7 e 10 minutos de caminhada, respectivamente). Já para o modelo de localização de máxima cobertura, manteve-se a distância máxima permitida de caminhada em 600 e 800 metros e variou-se o número de estações de bicicletas a serem instaladas: 8 e 5, respectivamente. Essas combinações geraram os quatro cenários a seguir:

- Cenário 1: modelo de localização por cobertura, com $d = 600m$;
- Cenário 2: modelo de localização por cobertura, com $d = 800m$;
- Cenário 3: modelo de máxima cobertura com $d = 600$ e $p = 8$; e
- Cenário 4: modelo de máxima cobertura com $d = 800$ e $p = 5$.

Os resultados computacionais dos cenários são apresentados em forma de tabela nas figuras a seguir, onde as linhas representam o prédio em que a estação de bicicletas foi instalada e a coluna os prédios cobertos por aquela estação. Isto é, o espaço hachurado de preto significa que o bicicletário instalado no edifício daquela linha, atende o edifício da coluna do espaço hachurado.

- **Cenário 1 – modelo de localização por cobertura com $d = 600m$**

No Cenário 1, a distância máxima de caminhada é de 600 metros para o modelo de localização por cobertura. Nesse caso, 11 estações de bicicletas são localizadas, conforme mostra a Figura 1. Observa-se que existe sobreposição de cobertura para dois edifícios: 2 e 17.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	
1	■																						
2		■							■									■					
3			■															■	■				
4				■	■								■										
7						■	■			■												■	■
11											■										■		
12												■											
14														■									
15															■								
17		■							■									■	■				
22																							■

Figura 1: Resultado computacional do Cenário 1 – onze estações instaladas.

- **Cenário 2 – modelo de localização por cobertura com $d = 800m$**

No Cenário 2, a distância máxima de caminhada é de 800 metros para o modelo de localização por cobertura. Nesse caso, 7 estações de bicicletas são localizadas, conforme mostra a Figura 2. Observa-se que agora existe sobreposição de cobertura para cinco edifícios: 2, 9, 10, 13, e 22.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
2																						
3																						
4																						
7																						
11																						
15																						
22																						

Figura 2: Resultado computacional do Cenário 2 – sete estações instaladas.

• **Cenário 3 – modelo de localização de máxima cobertura com $d = 600m$ e $p = 8$**

No Cenário 3, a distância máxima de caminhada é de 600 metros e o número de estações de bicicletas a serem instaladas é fixada em 8 para o modelo de localização de máxima cobertura. Observa-se que nesse cenário, os edifícios 12,15 e 22, que representam a Prefeitura Universitária, a Vila Residencial e o Instituto de Engenharia Nuclear (IEN), respectivamente, deixaram de ser cobertos pelo sistema de bicicletas compartilhadas, conforme mostra a Figura 3.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
1																						
2																						
3																						
4																						
7																						
14																						
17																						
20																						

Figura 3: Resultado computacional do Cenário 3 – edifícios 12, 15 e 22 não cobertos.

A Tabela 1 mostra as estações de bicicletas instaladas e os edifícios atendidos no Cenário 3, com destaque para a demanda atendida. As limitações de distância máxima percorrida a 600 metros e instalação de no máximo 8 estações de bicicletas fazem com que 95% da demanda do sistema seja coberta.

Tabela 1: Estações de bicicletas instaladas e respectivos edifícios atendidos no Cenário 3.

Edifícios onde serão instaladas as estações de bicicletas	Edifícios atendidos por cada estação de bicicletas	Demanda atendida de cada edifício	Demanda total atendida	% da demanda atendida
CCMN	CCMN	31	31	8%
	CCS	38		
CCS	HU	25	68	17%
	BIO RIO	5		
CENPES	CENPES	6	18	5%
	CEPEL	6		
	CENPES 2	6		
CETEM	CETEM	9	34	8%
	COPPEAD	9		
	REITORIA	15		
CT 2	CT 1	62	105	26%
	CT 2	9		
	LETRAS	31		
	IEN	3		
ESTAÇÃO BRT	ESTAÇÃO BRT	46	46	12%
BIO RIO	CCS	38	68	17%

	EEFD	12		
	ALOJAMENTO	5		
	BIO RIO	12		
	PARQUE			
LABOCEANO	TECNOLÓGICO	9	12	3%
	LABOCEANO	3		
	TOTAL		381	95%

• **Cenário 4 – modelo de localização de máxima coberturas com $d = 800m$ e $p = 5$**

No Cenário 4, a distância máxima de caminhada é de 800 metros e o número de estações de bicicletas a serem instaladas é fixada em 5 para o modelo de localização de máxima cobertura. Observe que nesse cenário, os edifícios 15 e 20, que representam a Vila Residencial e o LabOceano, respectivamente, deixaram de ser cobertos pelo sistema de bicicletas compartilhadas, conforme mostra a Figura 4.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
2		■						■	■							■	■					■
3	■		■					■	■									■	■			
7						■	■			■												■
13				■	■						■		■									
22		■							■			■		■								■

Figura 4: Resultado computacional do cenário 4 – edifícios 15 e 20 não cobertos.

A Tabela 2 mostra as estações de bicicletas instaladas e os edifícios atendidos no Cenário 4, com destaque para a demanda atendida. As limitações de distância máxima percorrida de 800 metros e instalação de no máximo 5 estações de bicicletas fazem com que 97% da demanda do sistema seja coberta.

Tabela 2: Estações de bicicletas instaladas e respectivos edifícios atendidos no Cenário 4.

Edifícios onde serão instaladas as estações de bicicletas	Edifícios atendidos por cada estação de bicicletas	Demanda atendida de cada edifício	Demanda total atendida	% da demanda atendida
CCS	CCS	38	86	22%
	EEFD	12		
	HU	12		
	ALOJAMENTO	9		
	BIO RIO	12		
	IPPMG	2		
CENPES	CCMN	31	49	12%
	CENPES	6		
	CEPEL	6		
	CENPES 2	6		
CT 2	CT 1	62	105	26%
	CT 2	9		
	LETRAS	31		
REITORIA	IEN	3	43	11%
	CETEM	9		
	COPPEAD	9		
	PARQUE TECNOLÓGICO	9		
IPPMG	REITORIA	15	105	26%
	CCS	38		

HU	12		
PREFEITURA UNIVERSITÁRIA	6		
ESTAÇÃO BRT	46		
IPPMG	2		
TOTAL		388	97%

1.5. Análise de sensibilidade

Conforme mencionado ao final da seção 3, o modelo de localização de máxima cobertura pode ser utilizado para construir curvas que refletem os níveis de compromisso entre a população coberta (demanda atendida) e o número de facilidades localizadas.

Nesse sentido, realizou-se uma análise de sensibilidade verificando a demanda atendida quando se fixa a distância máxima permitida em 400, 600, 800 e 1000 metros, e o número de estações de bicicletas variando de 1 a 17 (número de estações de bicicletas necessárias para atender 100% da demanda na menor distância fixada). Os resultados são apresentados no gráfico da Figura 5, a seguir.

Por meio da análise de sensibilidade, como esperado, verifica-se que quanto maior a distância máxima permitida de caminhada (i.e., menor nível de serviço), menor o número de estações de bicicletas necessárias para cobrir toda a demanda.

Identifica-se, também, que o ganho marginal por estação de bicicletas adicional instalada é decrescente. Tal comportamento é observado através dos coeficientes angulares das quatro curvas que, no início, apresentam valores mais elevados, e, conforme as estações vão sendo adicionadas, tendem a diminuir (as curvas tendem a ficar horizontais).

Destaca-se que a partir da quinta estação de bicicletas instalada para a distância de 800 metros, a oitava estação de bicicletas para a distância de 600 metros e a nona estação de bicicletas para a distância de 400 metros, o ganho de demanda coberta é de apenas 2% por estação de bicicletas adicional instalada. Este padrão deve ser considerado ao se dimensionar o sistema de bicicletas, ponderando-se o compromisso entre os recursos financeiros disponíveis e a quantidade de demanda que se deseja atender.

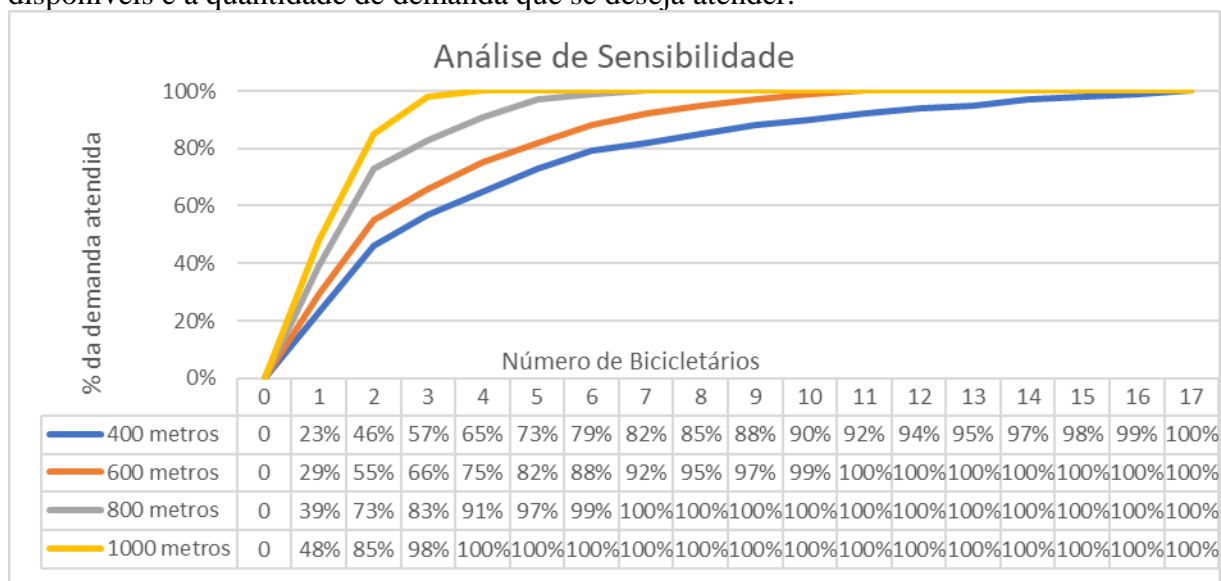


Figura 5: Níveis de compromisso entre a demanda atendida e o número de facilidades localizadas.

1.6. Dimensionamento do sistema de bicicletas conforme o cenário 3

A partir dos resultados computacionais apresentados nas seções 4.2 e 4.3, decidiu-se utilizar o Cenário 3 como exemplo de dimensionamento do sistema de bicicletas da Cidade Universitária.

A premissa do cenário 3 é de instalar 8 estações de bicicletas na Ilha do Fundão, atendendo a uma demanda localizada a 600 metros de distância de cada estação. De acordo com o ITDP (2014), são necessárias de 2 a 2,5 vagas para cada bicicleta no sistema. Assim, a Tabela 3, a seguir, define o número de vagas necessárias em cada uma das 8 estações a serem implantadas considerando duas vagas por bicicleta do sistema.

Tabela 3: Dimensionamento do sistema de bicicletas conforme o cenário 3.

Edifícios onde serão instaladas as estações de bicicletas	Edifícios atendidos por cada estação de bicicletas	Número de bicicletas	Número de vagas de bicicletas
CCMN	CCMN	31	62
CCS	CCS	68	136
	HU		
	BIO RIO		
CENPES	CENPES	18	36
	CEPEL		
	CENPES 2		
CETEM	CETEM	34	68
	COPPEAD		
	REITORIA		
CT 2	CT 1	105	210
	CT 2		
	LETRAS		
	INSTITUTO DE ENGENHARIA NUCLEAR		
ESTAÇÃO BRT	ESTAÇÃO BRT	46	92
BIO RIO	CCS	68	136
	EEFD		
	ALOJAMENTO		
LABOCEANO	BIO RIO	12	24
	PARQUE TECNOLÓGICO		
	LABOCEANO		

A Figura 6 apresenta o mapa do sistema de compartilhamento de bicicletas decidido pela aplicação dos modelos de localização de máxima cobertura: as oito estações de bicicletas aparecem localizadas em azul, os edifícios atendidos aparecem em amarelo, e os edifícios não atendidos aparecem em vermelho.

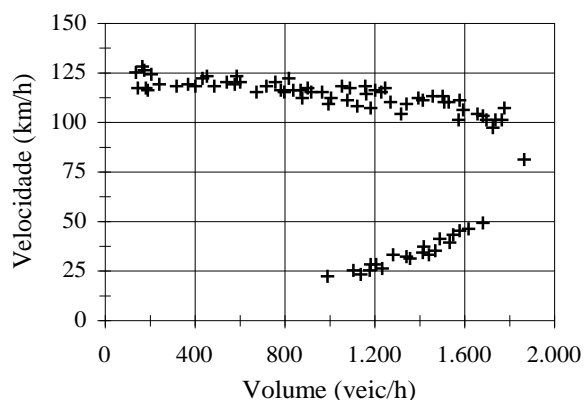


Figura 2: Variação da velocidade média com o volume de tráfego

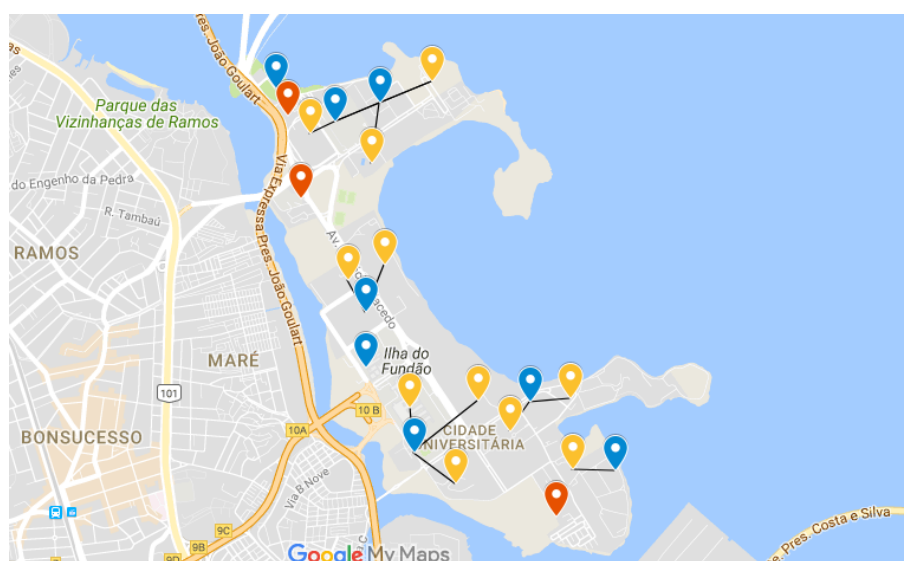


Figura 6: Sistema de compartilhamento de bicicletas da Cidade Universitária.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

As referências bibliográficas são obrigatórias para as contribuições propostas na categoria. Conclui-se que os modelos de localização são úteis para o dimensionamento e alocação de estações em sistemas públicos de bicicletas compartilhadas. Foram apresentadas aplicações de dois tipos de modelos: localização por cobertura e localização de máxima cobertura.

Apesar de ambos se mostrarem eficazes para o dimensionamento do sistema de bicicletas, o modelo de localização de máxima cobertura se mostrou mais próximo à realidade ao considerar dados de demanda e número máximo de estações de bicicletas a serem instaladas.

Para desenvolvimento de um modelo ainda mais preciso, recomenda-se a utilização de métodos probabilísticos para estimar a demanda de cada edifício. Para tal estimativa, deve-se fazer o levantamento das características socioeconômicas dos potenciais utilizadores do sistema, além de aplicar pesquisas de preferência declarada.

Por fim, é importante também avaliar as condições do ambiente construído no local do sistema como um todo, verificando a existência de ciclovia, calçadas, iluminação, dentre outros atributos que estimulem a utilização da bicicleta compartilhada na Cidade Universitária.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer ao Prof. Glaydston de Mattos Ribeiro do Programa de Engenharia de Transportes da COPPE/UFRJ por todo o estímulo e apoio na elaboração deste artigo e ao CNPq, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – Brasil, pelo apoio na realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CHURCH, R.L. & REVELLE, C. *The maximal covering location problem*. Papers of the Regional Science Association, 32:101-118, 1974.
- DREZNER, Z. (Ed.). (1995). *Facility location: a survey of applications and methods*. Springer Verlag.
- FINGER, BERT, KUPFER, MONTERO, WOLEK, 2017, *Research for TRAN Committee – Infrastructure funding challenges in the sharing economy*, European Parliament, Policy Department for Structural and Cohesion Policies, Brussels
- GALVÃO, R. D.; CHIYOSHI, F. Y.; ESPEJO, L. G. A.; RIVAS, M. P. A. (2003) *Solução do problema de localização de máxima disponibilidade utilizando o modelo hipercubo*. Pesquisa Operacional, v.23, n.1, p. 61-78
- GOUDARD, B. & OLIVEIRA, F. & GERENTE, J. (2015). *Avaliação de modelos de localização para análise da distribuição espacial de unidades básicas de saúde*. Revista Brasileira de Cartografia. 67. 15-34.
- ITDP (2014). Instituto de Políticas de Transporte e Desenvolvimento. *Guia de Planejamento de sistemas de bicicletas compartilhadas*. Rio de Janeiro. 153 p. Disponível em: http://www.fundoverde.ufrj.br/images/noticias/sistema_de_bicicletas_publicas.pdf. Acesso em: 6/6/2018.
- LIMA, G. C. L. de S. (2018) *Mobility as a Service na promoção da mobilidade sustentável: O caso do Rio de Janeiro* (2018). Monografia – Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Disponível em: <http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10024175.pdf>.
- LIMA, R. S. (2003) *Bases para uma metodologia de apoio à decisão para serviços de educação e saúde sob a ótica dos transportes*. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação Engenharia Civil-Transportes, Universidade de São Paulo, São Carlos, 200f.
- MAPA, S. M.S.; LIMA, R. S. (2012) *Uso Combinado de sistemas de informações geográficas para transportes e programação linear inteira mista em problemas de localização de instalações*. Revista Gestão e Produção, São Carlos, Vol. 19, nº 1, p. 119-136.
- PIZZOLATO, N. D.; ROZENTAL, M. (2009) *Localização de shoppings centers de vizinhança. Estudo de caso: Barra da Tijuca, Rio de Janeiro – RJ*. Pesquisa Operacional para o Desenvolvimento, Rio de Janeiro, v.1, n.3, p. 199-207.
- REVELLE, C., MARKS, D., LIEBMAN, J. C., (1970) *An Analysis of Private and Public Sector Location Models*, Management Science, Vol. 16, pp. 692-707.
- THECITYFIXBRASIL,2015. Disponível em: <http://thecityfixbrasil.com/2015/05/14/6-coisas-que-voce-nao-sabia-sobre-sistemasbike-share/>. Acesso em: 6/6/2018.