

GIULIA MARTUSCELLI FARIA

DIMENSIONAMENTO E LOCALIZAÇÃO DE ESTAÇÕES DE COMPARTILHAMENTO
DE BICICLETAS EM UMA CIDADE DE MÉDIO PORTE

Guaratinguetá - SP

2017

GIULIA MARTUSCELLI FARIA

DIMENSIONAMENTO E LOCALIZAÇÃO DE ESTAÇÕES DE COMPARTILHAMENTO
DE BICICLETAS EM UMA CIDADE DE MÉDIO PORTE

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia de Produção Mecânica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia de Produção Mecânica.

Orientador (a): Prof. Dr. José Roberto Dale Luche

Guaratinguetá - SP


2017

F224d Faria, Giulia Martuscelli
Dimensionamento e localização de estações de compartilhamento de bicicletas em uma cidade de médio porte / Giulia Martuscelli Faria – Guaratinguetá, 2017.
452 f : il.
Bibliografia: f. 50-52

Trabalho de Graduação em Engenharia de Produção Mecânica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2017.
Orientador: Prof. Dr. José Roberto Dale Luche

1. Planejamento urbano. 2. Bicicletas. 3. Programação linear. I. Título.

CDU 711.4


Luciana Máximo
Bibliotecária/CRB-8 3595

DIMENSIONAMENTO E LOCALIZAÇÃO DE ESTAÇÕES DE
COMPARTILHAMENTO DE BICICLETAS EM UMA CIDADE DE MÉDIO PORTE


GIULIA MARTUSCELLI FARIA

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
“GRADUADO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO MECÂNICA”

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM NOME DO CURSO


Profa. Dra. ARMINDA EUGENIA MARQUES CAMPOS
Coordenadora

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. JOSÉ ROBERTO DALE LUCHE
Orientador/UNESP-FEG


Prof. Dr. ANEIRSON FRANCISCO DA SILVA
UNESP-FEG


ME. STEFANO PETRINI DE OLIVEIRA
UNESP-FEG

Dezembro 2017

DADOS CURRICULARES

GIULIA MARTUSCELLI FARIA

NASCIMENTO 10.06.1995 – Pindamonhangaba / SP

FILIAÇÃO Gerson Geraldo Mendes Faria

Elzira Martuscelli Faria

2013/2017 Curso de Graduação em Engenharia de Produção Mecânica, na Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá da Universidade Estadual Paulista

Dedico este trabalho, de modo especial, à minha família, meus pais, meu irmão, meus avós, meu namorado e meus amigos, que sempre estiveram ao meu lado e me apoiaram durante a minha graduação.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus, fonte da vida e de luz. Agradeço pela minha vida, minha inteligência, minha família e meus amigos.

Ao meu orientador, *Prof. Dr. José Roberto Dale Luche* que esteve comigo em muitos momentos da minha graduação e me ensinou que nenhum obstáculo é grande o bastante, que não possa ser superado. Sem a sua orientação, dedicação e auxílio, o trabalho aqui apresentado não seria possível.

Aos meus pais *Gerson e Elzira*, que sempre me incentivaram nos estudos e me apoiaram em meus desafios, apesar das adversidades. Os seus ensinamentos foram a base de todo o meu desenvolvimento pessoal, acadêmico e profissional.

Ao meu namorado *Felipe*, que sempre esteve ao meu lado e me ajudou a acreditar que seria possível superar todos os desafios com a dedicação necessária. Seu apoio e compreensão foram fundamentais durante o desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus tutores de estágio *Carlos e Luciana*, que sempre compreenderam os meus desafios e nunca deixaram de me apoiar e fornecer o suporte necessário para o meu crescimento pessoal e profissional.

Aos grandes amigos que eu conheci e tive a oportunidade de conviver diariamente ao longo de minha graduação, que me ensinaram a encarar a vida de uma forma mais leve e alegre. Em especial, às minhas amigas *Julie e Isadora*, que dividiram essa jornada comigo e em sempre me apoiaram em cada etapa.

"Sempre tenha em mente que sua própria determinação para com o sucesso é mais importante do que qualquer outra coisa"

Abraham Lincoln

RESUMO

Os centros urbanos, ainda em expansão, sofrem cada vez mais com problemas de transporte relacionados à elevada taxa de motorização. A busca por alternativas de transporte mais sustentáveis é uma tendência mundial e o investimento em programas de compartilhamento de bicicletas públicas, também conhecidos como programas de *bike sharing*, cresceu intensamente na última década. Entretanto, problemas de planejamento e gestão desses sistemas dificultam o seu funcionamento, refletindo em baixa utilização. Este trabalho tem o intuito de otimizar o dimensionamento e a localização das estações de *bike sharing*, por serem fatores que influenciam diretamente na usabilidade do serviço. A resolução do problema está ligada a técnicas de modelagem matemática de Pesquisa Operacional, por meio da programação linear. O estudo é composto de pesquisas bibliográficas e documentais, que servem de suporte para o desenvolvimento do modelo matemático. O modelo foi proposto para a cidade de São José dos Campos, por ser uma cidade de relevância na região do Vale do Paraíba, SP, e por seu incentivo a práticas de mobilidade urbana sustentável. Com isso, o modelo matemático fornece uma solução ótima de localização e capacidade das estações de *bike sharing*, com base nos dados de entrada de uma amostra da cidade.

PALAVRAS-CHAVE: Sistemas de Bike Sharing. Mobilidade Urbana Sustentável. Programação Linear.

ABSTRACT

The expanding urban centres suffer more and more with problems of transport related to the high rate of motorization. The search for more sustainable transportation alternatives is a worldwide trend and investment in public bicycle sharing programs (also known as Bike Sharing Programs), has grown steadily over the past decade. However, problems related to system's planning and management makes it difficult to operate, reflecting on low usage. This paper aims to optimize the dimensioning and location of the bike sharing stations, as these are factors that directly influence the service level. The problem solving is related to mathematical modeling techniques of Operational Research, using linear programming. The study is composed of bibliographical and documentary researches, which support the development of the mathematical model. The model is solved for the city of São José dos Campos, as it is a city of relevance in the Vale do Paraíba's region and for its incentive to sustainable urban mobility practices. Therefore, the mathematical model provides an optimal location and capacity solution for the bike sharing stations, based on input data from a sample of the city.

KEYWORDS: Bike Sharing System. Sustainable Urban Mobility. Linear Programming.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- Figura 1 – Número de Publicações por Ano para as Palavras Chave “Bike Sharing”, “Bike Share” e “Bicycle Sharing”
- Figura 2 - Número de Publicações por Ano para as Duplas de Palavras Chave
- Figura 3 – Número de Publicações por Ano para a Combinação de Todas as Palavras Chave
- Figura 4 – Processo de Desenvolvimento de um Modelo Matemático
- Figura 5 – Evolução no Número de Automóveis em São José dos Campos
- Figura 6 – Evolução no Número de Ônibus em São José dos Campos
- Figura 7 – Estação de *Bike Sharing* “Citi Bike” na Cidade de Nova Iorque
- Figura 8 – Divisão da Cidade de São José dos Campos em Macrozonas
- Figura 9 – Indicadores para Embasamento do Modelo
- Figura 10 – Relações dos Indicadores com a Literatura
- Figura 11 – Mapeamento da Região de Trabalho por Nós e *Links*
- Figura 12 – Definição dos Locais de Interesse na Região de Trabalho
- Figura 13 – Definição dos Pontos de Ônibus na Região de Trabalho
- Figura 14 – Região de Trabalho Completa para Resolução do Problema
- Figura 15 – Definição dos Pontos de Referência para Cobertura da Área
- Figura 16 – Resultado Gerado com a Implementação do Modelo Matemático
- Figura 17 – Resultado do Modelo Adaptado com Foco em *Set Covering*
- Quadro 1 – Classificação da Pesquisa

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Denominação dos Pontos de Interesse em São José dos Campos

Tabela 2 – Quantidade de Pontos de Ônibus por *Link* até o Décimo Nó

Tabela 3 – Quantidade de Pontos de Ônibus nas Proximidades dos Dez Primeiros Nós

Tabela 4 – Dimensionamento Padrão das Estações de *Bike Sharing*

Tabela 5 – Estimativa de Custos para a Construção dos Três Tamanhos de Estações

Tabela 6 – Distribuição dos Pontos de Referência pelos Nós Próximos

Tabela 7 – População Aproximada ao Redor dos Dez Primeiros Nós

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	12
1.2	OBJETIVO	13
1.3	DELIMITAÇÃO	14
1.4	JUSTIFICATIVA	14
1.5	ESTRUTURA DO TRABALHO	15
2	REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA	16
2.1	LEVANTAMENTO DE ARTIGOS	16
2.2	HISTÓRICO DOS PROGRAMAS DE BIKE SHARING	18
2.3	ANÁLISE DAS PUBLICAÇÕES	19
2.3.1	Abordagem Qualitativa.....	19
2.3.2	Abordagem Quantitativa	21
2.3.3	Indicadores	22
3	MÉTODOS DE PESQUISA	24
4	ANÁLISE DO PROBLEMA	26
4.1	CONTEXTUALIZAÇÃO	26
4.2	DEFINIÇÃO DA REGIÃO DE TRABALHO	28
4.3	INDICADORES	30
4.4	DESENVOLVIMENTO DO MODELO	32
4.5	APRESENTAÇÃO DOS PARÂMETROS E DADOS	34
5	ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	43
6	CONCLUSÃO.....	48
	REFERÊNCIAS	50

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Com o crescimento do uso de veículos particulares motorizados na última década, os centros urbanos brasileiros sofrem cada vez mais com congestionamentos (AMANN et al., 2016). A necessidade de minimizar os problemas de transporte e criar um sistema de mobilidade mais sustentável fez com que os programas de compartilhamento de bicicletas, também conhecidos como *bike sharing*, ganhassem força nos últimos anos.

Na última década, os programas de *bike sharing* passaram por um intenso crescimento mundial. Em 2013, esses sistemas contavam com mais de 700.000 bicicletas, comparadas a alguns milhares no início dos anos 2000. Atualmente, há cerca de 1400 programas ativos, com mais de 4,5 milhões de bicicletas, e 400 programas em desenvolvimento em todo o mundo (MEDDIN; DEMAIO, 2017).

Apesar do intenso crescimento do número de programas de *bike sharing* no mundo, a presença no Brasil ainda é escassa. De acordo com o mapa City Bikes (2017), há somente dezesseis cidades brasileiras com estações de *bike sharing* implantadas. Porém, a falta de incentivo faz com que a sua utilização seja baixa e com que grande parte de suas estações estejam vazias. Esse problema é uma consequência da ausência de ferramentas de planejamento e rebalanceamento adequadas, o que contribui para uma baixa taxa de utilização.

A utilização de técnicas de Pesquisa Operacional pode auxiliar no processo de desenvolvimento e gestão dos sistemas de *bike sharing*, de modo a aumentar a sua efetividade. Essas técnicas matemáticas colaboram com o desenvolvimento planejado de novos sistemas, melhoria do fluxo de funcionamento de sistemas existentes ou em processo de modificação, solução de problemas de redistribuição, entre outros (SHU et al., 2013).

A programação linear é uma técnica de solução de problemas bastante explorada na literatura para modelos relativos a sistemas de *bike sharing*. Técnicas que envolvam programação linear são empregadas em diferentes abordagens para análise e desenvolvimento desses programas, como disponibilidade e segurança (ASHAKARI; BASHIRI, 2017), nível

de serviço (LIN; YANG, 2011) e até mesmo em problemas de localização (MARTINEZ et al., 2012).

Para o desenvolvimento do estudo em questão, foi elaborado um modelo levando em consideração as características da cidade de São José dos Campos em relação à distribuição geográfica, distâncias relativas, custos de implantação e manutenção do sistema, riscos relacionados à segurança dos ciclistas, entre outros fatores determinantes. A programação linear é utilizada como um método para otimizar esse modelo, buscando a maximização da área de cobertura das estações e do número de bicicletas alocadas, aos menores custos envolvidos.

O método da programação linear se mostra como o mais adequado a ser empregado na resolução do estudo em questão. Ele é um método considerado mais simples em sua implementação e conveniente por levar em conta parâmetros obtidos do campo de estudo, que condiz com a característica do problema de apresentar alternativas que estão sujeitas a restrições. Um problema resolvido por programação linear ainda apresenta uma solução ótima, considerando o conjunto de dados, seu objetivo e suas restrições (GOLDBARG; LUNA, 2005).

Com isso, este estudo pretende determinar quais benefícios podem ser obtidos ao se resolver o problema combinado de localização e dimensionamento de estações de *bike sharing*, por meio da programação matemática.

1.2 OBJETIVO

O objetivo geral deste trabalho é a otimização do dimensionamento e localização das estações de *bike sharing* projetadas para a cidade de São José dos Campos.

Os objetivos específicos são:

- Parametrização dos dados relativos à mobilidade de São José dos Campos;
- Desenvolvimento de um modelo de programação matemática para resolver o problema de dimensionamento e localização de estações de *bike sharing*;

- Desenvolvimento de um mapa representativo da abrangência do sistema de compartilhamento de bicicletas obtido a partir do modelo de programação matemática.

1.3 DELIMITAÇÃO

Este trabalho está limitado ao estudo do dimensionamento e da localização de estações de *bike sharing*, partindo de dados existentes na literatura e documentos de governos e entidades operadoras. Os indicadores aplicados na análise do problema foram adaptados de trabalhos existentes na literatura. O estudo será realizado com base nos dados de São José dos Campos, uma cidade de grande porte do Estado de São Paulo.

1.4 JUSTIFICATIVA

O projeto da rede de compartilhamento de bicicletas é um problema complexo, pois envolve uma série de variáveis e restrições que devem ser consideradas para atender às necessidades reais das cidades. Além disso, para a resolução do problema é preciso levantar dados reais sobre a cidade, a fim de que a solução ótima do modelo linear represente a realidade e contribua de fato para a tomada de decisão.

Por se tratar de um problema combinado, no qual os aspectos de localização das estações do sistema e de dimensionamento do número de bicicletas nessas estações são estudados, a elaboração do modelo que resolva simultaneamente ambas as necessidades torna o trabalho mais difícil de ser executado.

Esses fatores de complexidade são limitações para que esse estudo seja desenvolvido pelas cidades antes da implantação dos programas. Desse modo, a elaboração do modelo, com base em estudo detalhado sobre o assunto, contribui não só para a literatura a respeito do tema, mas também para os órgãos encarregados na cidade de São José dos Campos, uma vez que a análise torna-se simplificada, bastando informar os dados de entrada no modelo para obter a solução ótima.

Outra vantagem do projeto do modelo em questão é que ele pode ser expandido para outras cidades ou regiões, sendo necessário realizar poucos ajustes para representar com maior veracidade as características da cidade. A oportunidade de aplicação do modelo em outros campos é interessante, pois contribui diretamente para o incentivo à mobilidade urbana

sustentável, visto que o sistema será projetado para atender melhor às necessidades dos usuários, ao menor custo possível.

1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho está dividido em uma estrutura de seis capítulos. Neste primeiro capítulo foram expostas as considerações introdutórias a este trabalho e suas diretrizes para execução. No capítulo seguinte, será apresentada uma revisão da literatura mais atual sobre o tema, que utiliza como base as palavras chave definidas para esse estudo. No terceiro capítulo, serão evidenciados os métodos de pesquisa empregados neste trabalho. No capítulo 4, será feita a contextualização do problema, com a apresentação das características do campo de estudo e a análise do problema a ser resolvido. No capítulo seguinte, os resultados obtidos do problema resolvido serão mostrados e as contribuições desse novo cenário serão analisadas frente ao atual. Por fim, no sexto capítulo, será feita a conclusão do trabalho, verificando se os objetivos propostos foram alcançados, fazendo as considerações finais do estudo e também sugerindo propostas para trabalhos futuros que possam preencher as lacunas deixadas por este estudo e enriquecer a literatura sobre o tema.

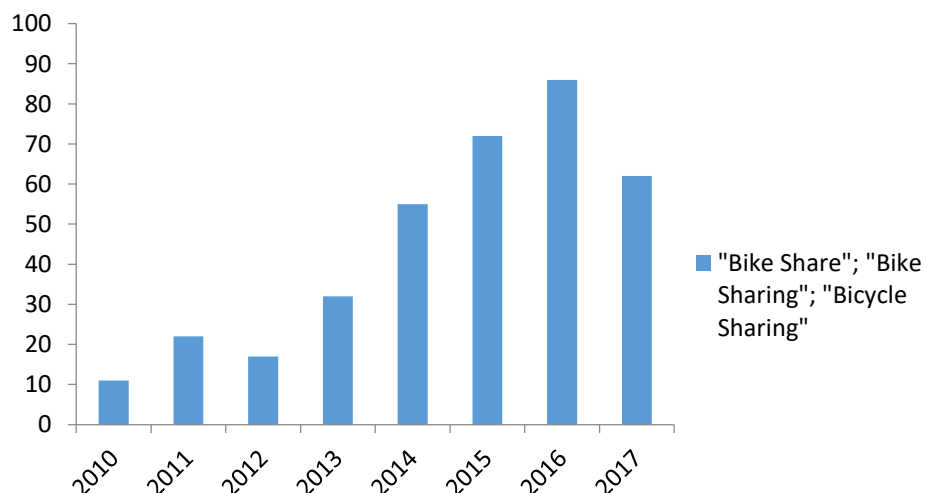
2 REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA

2.1 LEVANTAMENTO DE ARTIGOS

Para analisar a recorrência do tema nos últimos anos, foi realizado um levantamento dos dados de publicação de artigos em *journals* a partir de 2010. Essa etapa inicial da revisão da literatura utilizou a base de publicações científicas *Web of Science* para coleta de dados e de artigos relevantes ao estudo. Para essa análise, foram utilizadas as palavras-chave “*Bike Sharing*” (aliado a suas variações “*Bike Share*” e “*Bicycle Sharing*”), “*Location*”, “*Dimensioning*” e “*Linear Programming*”.

Por conta da atualidade do tema, optou-se por iniciar a análise da literatura pela palavra-chave “*Bike Sharing*” e suas variações. Essa primeira etapa do levantamento foi realizada sem associações a demais palavras por se tratar do termo que define o problema em sua amplitude. Conforme pode ser notado no gráfico da Figura 1, há uma tendência ao crescimento do tema na literatura nos últimos anos. Para o ano de 2017, os dados são considerados como parciais, mas espera-se que a tendência de publicações prevaleça como no ano anterior.

Figura 1 – Número de Publicações por Ano para as Palavras Chave “*Bike Sharing*”, “*Bike Share*” e “*Bicycle Sharing*”



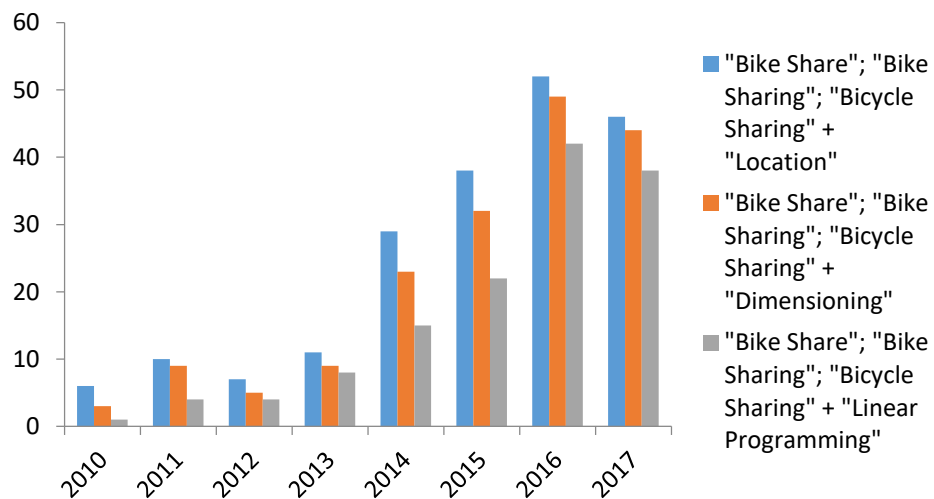
Fonte: Adaptado de Web of Science (2017)

A análise conjunta das palavras-chave também permite considerações interessantes sobre o assunto. Para essa análise, aliou-se o termo “*Bike Sharing*” e seus derivados a cada

uma das demais palavras-chave definidas separadamente. Os resultados foram apresentados na Figura 2 em um gráfico comparativo dos conjuntos lado a lado. Da mesma forma que anteriormente, notou-se um crescimento do assunto desde 2010, despontando principalmente em 2014. A tendência para o ano de 2017 também permanece a mesma do caso anterior.

Ainda na análise conjunta dos termos, é possível pontuar que o tema da localização (“*Location*”) em relação aos sistemas de *bike sharing* é o predominante entre os temas, seguido do dimensionamento (“*Dimensioning*”) e da abordagem por programação linear (“*Linear Programming*”). É necessário ressaltar que dentre esses artigos publicados há tratamentos do tema que não puderam ser filtrados em números, como a análise de redistribuição de bicicletas nas estações de *bike sharing* e, conseqüentemente, o roteamento dos veículos que realizam esse trabalho. Essa filtragem foi realizada em uma análise mais refinada dos artigos para embasamento do estudo, no qual foram priorizados aqueles que atendiam a caracterização de todas as palavras-chave.

Figura 2 - Número de Publicações por Ano para as Duplas de Palavras Chave

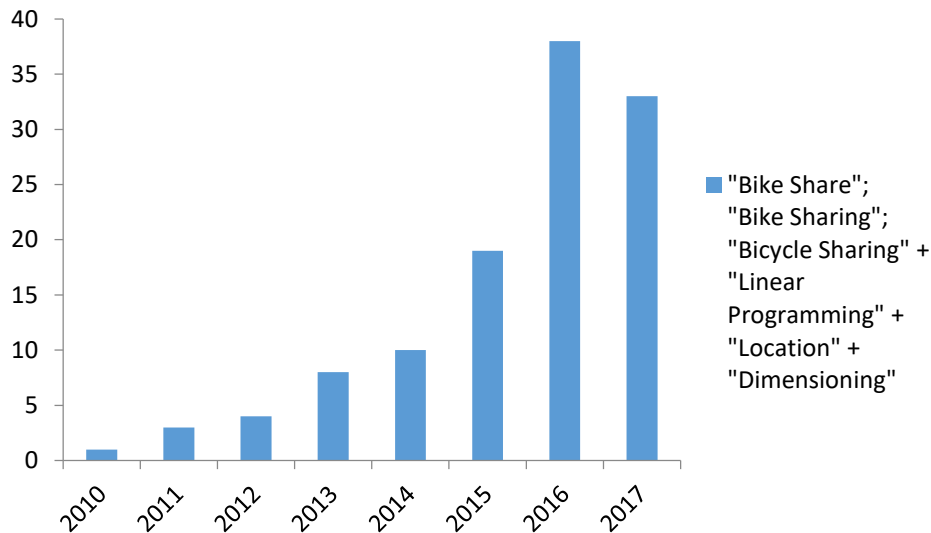


Fonte: Adaptado de Web of Science (2017)

Por fim, também foi realizada uma análise da combinação entre todas as palavras-chave do estudo, como apresentado na Figura 3. A tendência de crescimento do assunto nos últimos anos permaneceu do mesmo modo como nas demais análises, porém, em menor volume total, chegando a próximo de 40 publicações de artigos em *journals* no ano de 2016. Diferentemente dos demais, notou-se um salto entre os anos de 2015 e 2016, tendo praticamente dobrado o número de publicações. Por uma análise mais refinada do conjunto

dos termos, é possível observar problemas que se assemelham ao estudo em questão e servem como artigos fortes para o embasamento teórico.

Figura 3 – Número de Publicações por Ano para a Combinação de Todas as Palavras Chave



Fonte: Adaptado de Web of Science (2017)

2.2 HISTÓRICO DOS PROGRAMAS DE BIKE SHARING

O conceito de compartilhamento de bicicletas públicas surgiu em Amsterdã no ano de 1965, com o lançamento do programa *Witte Fietsen*, que significa Bicicletas Brancas. A iniciativa consistiu em bicicletas pintadas de branco, distribuídas pela cidade para o uso gratuito do público. Entretanto, a falta de mecanismos de controle e segurança contribuiu para que o programa tivesse uma curta duração (FISHMAN, 2016).

O programa “Bicicletas Brancas” consistiu na primeira geração de sistemas de bicicletas compartilhadas. Porém, a necessidade por maior segurança contribuiu para o surgimento da segunda geração do sistema no início dos anos 1990. Nesse momento, passou a ser necessária a inserção de moedas nas estações para se alugar uma bicicleta. A contrapartida desse modelo foi que não havia limite de tempo para a utilização da bicicleta e alguns chegaram até mesmo a não serem devolvidas.

Com isso, no final dos anos 1990, teve início a terceira geração de sistemas de *bike sharing*, com o uso de tecnologias que garantiam maior segurança e conforto para os usuários. Nesse modelo, as estações tornaram-se mais modernas, com a utilização de travas automáticas para as bicicletas e de cartões magnéticos para liberação das mesmas e pagamento da viagem.

Na terceira geração também surgiu o acesso dos usuários a *websites* com informações sobre a disponibilidade de bicicletas nas estações.

Atualmente, com a evolução da tecnologia, tem sido tratado sobre o desenvolvimento de uma quarta geração para os programas de *bike sharing*, na qual os usuários passam a ter mais interatividade com os sistemas, por meio de aplicativos para *smartphones* com informações em tempo real sobre a disponibilidade de todo o sistema, o que auxilia os usuários antes e durante as viagens. Além disso, também passam a existir estações carregadas à energia solar, bicicletas elétricas e cartões de acesso que permitem a integração com outros meios de transporte público (PARKES et al., 2013).

2.3 ANÁLISE DAS PUBLICAÇÕES

Os sistemas de *bike sharing* consistem na disponibilização de bicicletas de uso compartilhado em estações distribuídas no espaço urbano. O funcionamento do sistema se dá pelo seguinte fluxo: o usuário caminha até a estação mais próxima de sua origem, pega uma bicicleta, viaja até uma estação próxima a seu local de interesse, deixa a bicicleta e caminha até seu destino (DELL'AMICO et al., 2014).

2.3.1 Abordagem Qualitativa

A evolução dos sistemas de compartilhamento de bicicletas mostrou a importância da utilização de dispositivos de segurança para garantir o seu bom funcionamento, bem como a necessidade de infraestrutura das cidades para assegurar que os ciclistas usufruam de espaço adequado e seguro para a viagem. Em levantamento realizado na cidade australiana Brisbane, a preocupação com a segurança das vias foi a segunda razão que mais leva a população a não aderir ao seu programa, *CityCycle* (FISHMAN, 2016).

Fishman e Schepers (2016) analisam a questão da segurança relativa aos sistemas de *bike sharing* ao realizar dois estudos comparativos sobre acidentes. No primeiro estudo, o problema abordado trata-se de cidades em que esses programas estão implementados em comparação a cidades sem eles. Já na segunda análise, leva-se em consideração os usuários de bicicletas compartilhadas em relação aos ciclistas com bicicletas particulares. Em ambos os casos, foi constatado que usuários de sistemas de *bike sharing* apresentam menor risco de acidentes em relação aos ciclistas.

Há estudos sobre como os sistemas de *bike sharing* influenciam na prática de atividades físicas, nos ambientes urbanos, como analisado por Bauman et al. (2017). Entretanto, esses estudos ainda carecem de dados que representem todo o espaço coberto pelo sistema e a rotina dos usuários, apesar do crescimento na utilização dos sistemas ser observado como uma tendência ao aumento da prática de exercícios, reduzindo os níveis de sedentarismo da população da região.

Os sistemas de *bike sharing* ainda apresentam contribuições econômicas importantes para os usuários e para as cidades que os implantam. Além de questões relacionadas a bem estar e saúde, conveniência e economia de tempo de viagem, os usuários ainda têm menos custos com a utilização do modal, visto que não é necessário adquirir uma bicicleta e despender valores com manutenção. Para os usuários, basta arcar com eventuais custos de cadastro e/ou aluguel das bicicletas e com equipamentos de proteção. Para as cidades, ainda há benefícios mais amplos, visto que a redução das emissões de poluentes e do número de habitantes sedentários na região diminui os custos com saúde e tratamento do ar (BULLOCK; BRERETON; BAILEY, 2017).

A análise de padrões de distância percorridos pelos ciclistas também é uma métrica importante de ser verificada na literatura. Castillo-Manzano et al. (2016) traz um comparativo entre as distâncias médias de viagem entre usuários dos programas de compartilhamento de bicicletas e ciclistas particulares. É notado que as distâncias percorridas durante viagem pelos usuários de *bike sharing* são, em média, 750m mais curtas que as dos ciclistas com bicicletas particulares.

Ainda é essencial levar em consideração a questão da distribuição das estações de bicicletas compartilhadas no espaço físico de implantação. Para tanto, a distância entre cada uma dessas estações é um fator determinante para o bom funcionamento do sistema, podendo variar entre 200m e 800m. Programas bem consolidados como o BIXI, em Montreal, e o Vélib, em Paris, apresentam uma distância média de 300m entre as suas estações (GARCÍA-PALOMARES; GUTIÉRREZ; LATORRE, 2012). Lin e Yang (2011), por sua vez, destacam que a distância entre as estações e os pontos de origem e destino deve variar entre 300 e 500 metros.

Parkes et al. (2013) aborda a difusão dos sistemas de *bike sharing* em cidades da Europa e dos Estados Unidos. Com isso, é traçada uma relação entre o número de bicicletas e

a população das cidades para ambas as regiões de análise. A comparação do tamanho dos sistemas destaca que em cidades europeias o número de bicicletas é cerca de 40% maior que em cidades estadunidenses com o mesmo número de habitantes. Em cidades de 800 mil habitantes, por exemplo, há cerca de 500 bicicletas nos EUA e de 900 na Europa.

Essa análise comparativa ainda pode ser estendida para outros programas em todo o mundo. No trabalho de Caufield et al. (2017) são examinadas as características de funcionamento de sistemas em 48 cidades de médio porte. Assim, são apresentados os dados populacionais dessas cidades, além do número de estações e bicicletas existentes nos sistemas.

2.3.2 Abordagem Quantitativa

Apesar do planejamento dos sistemas de compartilhamento de bicicletas considerar aspectos qualitativos das cidades e hábitos dos usuários em geral, como o fluxo de viagens obedece aos desejos dos usuários do sistema, torna-se difícil estabelecer um padrão da movimentação das bicicletas e garantir o equilíbrio de oferta e demanda no sistema. Assim, questões como a necessidade de criação de um sistema robusto de redistribuição de bicicletas e a distância das estações dos locais de interesse tornam-se barreiras para implantação e bom funcionamento dos programas (FISHMAN, 2016).

O problema quantitativo de desenvolvimento de sistemas de *bike sharing* é tratado na literatura por meio de abordagens diferentes. Muitos autores exploram o problema do roteamento de veículos para a redistribuição das bicicletas entre as suas estações, a fim de equilibrar a oferta e a demanda do sistema (YOU; LEE; HSIEH, 2017; CRUZ et al., 2017; GHOSH et al., 2017). Porém, o foco do estudo recai sobre a elaboração de modelos para definição de novos sistemas e adequação de sistemas existentes.

Askari e Bashiri (2017) utilizaram modelos matemáticos para a resolução do problema de desenvolvimento de um sistema de *bike sharing*, considerando como objetivos a maximização da segurança e a minimização do custo. Os autores elaboraram um modelo de programação multiobjetivo com resolução por meio de dois algoritmos, de modo a buscar a solução de melhor desempenho. No artigo, ainda é abordada a transformação de um modelo não linear em linear.

Em Lin e Yang (2011), é elaborado um modelo não linear para a determinação dos locais de instalação de estações de *bike sharing*, baseado em definições para o nível de serviço. Na análise do problema são considerados outros modais de transporte público, como origens, e prédios, como destinos, além das demandas para cada ponto de origem e destino e as distâncias entre as estações entre si e com relação a esses pontos. Esse modelo é resolvido em um caso hipotético, para a minimização do custo da rede. Como resultado, ele gera um conjunto de estações de bicicletas, com suas respectivas capacidades e rotas entre as origens e os destinos.

Com relação à localização das estações, Martinez et al. (2012) utiliza dados da cidade de Lisboa para elaboração de um modelo de programação inteira mista. A análise é feita para a implementação de um sistema de *bike sharing* na cidade, considerando uma frota mista de bicicletas. Com isso, foram levantados no mapa da cidade os fluxos de movimentação de bicicletas ao longo do dia e com o modelo foi possível determinar a solução ótima para instalação de estações, de forma a atender a demanda de cada ponto com menos reposições.

2.3.3 Indicadores

A fim de refletir no modelo os aspectos mais importantes para o planejamento do sistema na cidade, foram analisados artigos nos quais houve levantamento de indicadores sobre os fatores que mais influenciavam a utilização dos sistemas de *bike sharing* ou que eram barreiras para o seu sucesso. Tal estudo dos indicadores forneceu embasamento para a definição de quais seriam empregados no modelo.

Além da análise qualitativa e quantitativa do espaço no qual as estações de *bike sharing* serão implantadas, é essencial considerar as percepções dos ciclistas e usuários em potencial sobre o sistema. Em Fernández-Heredia, Monzón e Jara-Díaz (2014), foi conduzida uma pesquisa no campus de uma universidade a respeito dos fatores motivadores e inibidores do uso da bicicleta. Para tanto, são consideradas as características sociodemográficas dos respondentes, os fatores que afetam a escolha de utilizar ou não o sistema e variáveis denominadas latentes, que tem um caráter subjetivo relacionado à percepção do usuário. Como resultado, observaram-se conjuntos de fatores que afetam a utilização do sistema como tempo e custo de viagem, distância, risco, topografia, infraestrutura cicloviária e aspectos ambientais.

Em Fishman et al. (2014), por sua vez, foi realizado um levantamento a respeito dos motivadores e das barreiras para o sucesso dos sistemas de *bike sharing* com base em duas cidades australianas. Para tanto, foi realizado um *survey* com cidadãos de ambas as cidades sobre as razões para uso ou não. Os fatores apontados tiveram intensidades similares para os dois programas. As principais barreiras identificadas na pesquisa foram dificuldades quanto à proximidade das estações, ao cadastro e uso dos sistemas e à inconveniência de carregar equipamentos de proteção e também a conveniência dos modais de transporte já utilizados e o risco percebido em utilizar a bicicleta.

Além da análise de indicadores focados em sistemas de *bike sharing*, há autores que analisam questões relacionadas ao planejamento de espaços cicloviários em geral. Cardoso e Campos (2016) revisam a presença de parâmetros na literatura relativa a sistemas de transporte com foco em bicicletas. Desse modo, os principais parâmetros e sua relevância no planejamento de sistemas são listados e divididos com base em segurança, conforto, sinalização e projeto e superfície da via.

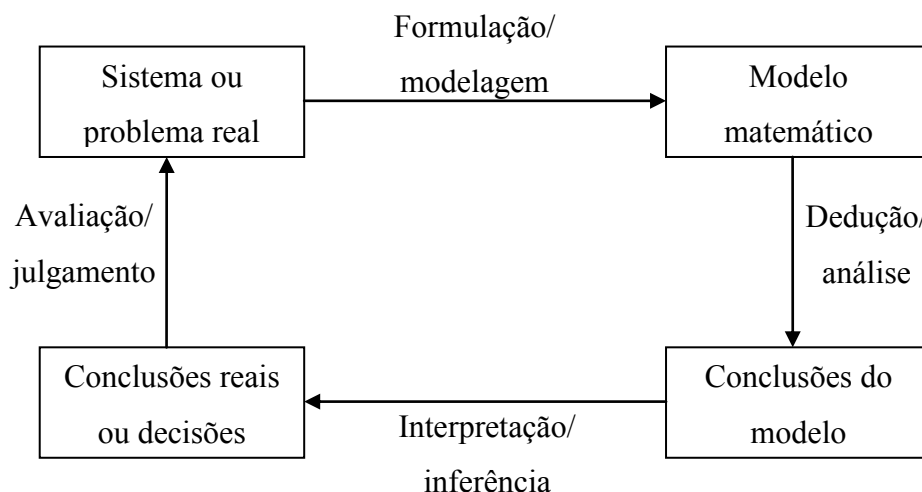
Em Marletto e Mameli (2012), a identificação de indicadores ocorreu por meio de um processo colaborativo. No caso, foi realizado um procedimento dividido em quatro etapas para selecionar os indicadores adequados do desempenho das políticas de mobilidade urbana sustentável. Nesse processo, cidadãos e *stakeholders* participaram junto ao grupo de pesquisa, por meio de um *survey* e pela análise das respostas com base em critérios, respectivamente. Como resultado, os indicadores ambientais, sociais e econômicos foram categorizados com base em sua percepção de importância.

3 MÉTODOS DE PESQUISA

Conforme exposto por Miguel et al. (2012), os modelos são representações da realidade, que permitem o tratamento de problemas de maneira sistemática e simplificada. A sua utilização contribui para a análise do problema e levantamento de estratégias de solução e dá suporte ao processo de tomada de decisão.

A modelagem matemática é o centro da resolução de problemas em Pesquisa Operacional, que visa planejar sistemas, geralmente a partir de situações reais, com o intuito de melhorar a eficiência da alocação de recursos (ARENALES et al., 2007). A Figura 4, extraída de Arenales et al. (2007) representa o processo de desenvolvimento de um modelo matemático.

Figura 4 – Processo de Desenvolvimento de um Modelo Matemático



Fonte: Adaptado de Arenales et al. (2007)

Segundo Bryman (1989 apud Miguel, 2012), a abordagem quantitativa do estudo é empregada quando é necessário analisar uma teoria por meio da aplicação objetiva de um método de solução para esse problema. Essa abordagem é conduzida pelo levantamento de hipóteses, coleta de dados, análise dos dados após processamento e, por fim, conclusões a partir do resultado do trabalho. No estudo quantitativo, pode haver ou não interferência na realidade, a partir da manipulação das variáveis do problema.

Quanto aos objetivos, o estudo pode ser classificado como exploratório e axiomático normativo. Nesse tipo de pesquisa, as variáveis relevantes e os dados a serem coletados

precisam ser levantados por meio de um estudo prévio do campo de trabalho, com o foco no desenvolvimento de um modelo de otimização para resolução do problema. Com esse embasamento, é possível conduzir a análise quantitativa, que no caso, será a elaboração do modelo matemático (MIGUEL et al., 2012).

Quadro 1 – Classificação da Pesquisa

NATUREZA	OBJETIVOS	ABORDAGEM	PROCEDIMENTOS
BÁSICA	EXPLORATÓRIA	QUALITATIVA	BIBLIOGRÁFICA
APLICADA	DESCRITIVA	QUANTITATIVA	DOCUMENTAL
	EXPLICATIVA	COMBINADA	ESTUDO DE CASO
	AXIOMÁTICA		<i>EXPOST FACTO</i>
	NORMATIVA		EXPERIMENTAL
			MODELAGEM/SIMULAÇÃO
			LEVANTAMENTO (<i>SURVEY</i>)
			PARTICIPANTE
			PESQUISA-AÇÃO

Fonte: Próprio Autor (2017)

Para a execução do trabalho, são utilizadas duas ferramentas principais: o *My Maps* e a IDE GAMS. O *My Maps* é uma aplicação disponibilizada dentro do *Google Maps*, que permite a customização de mapas, por meio da demarcação de pontos e traçado de retas, e a coleta de dados de localização. Essa ferramenta é utilizada tanto para a definição da área de trabalho e coleta de dados, quanto para o desenho da solução final, a fim de simplificar o seu entendimento, por meio de recursos visuais. Já a IDE GAMS, é um ambiente de desenvolvimento integrado para modelos algébricos, na qual o modelo desenvolvido é estruturado, implementado e resolvido utilizando o CPLEX.

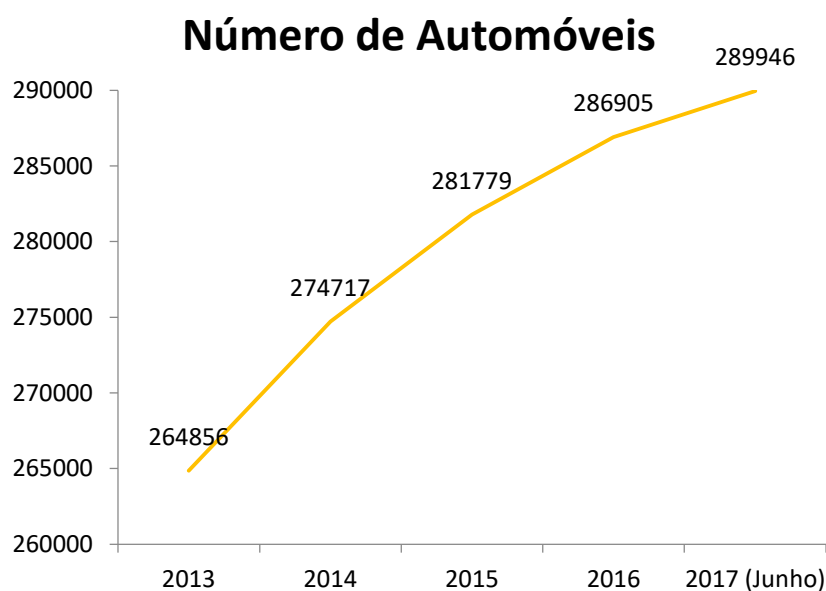
4 ANÁLISE DO PROBLEMA

4.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

São José dos Campos é considerada uma cidade de médio porte, localizada na região do Vale do Paraíba, interior do Estado de São Paulo. Segundo o IBGE, a cidade de cerca de 1.099,41 km² de área territorial apresenta, em 2017, uma população estimada de 703.219 habitantes, sendo considerada a maior de sua região.

A motorização de São José dos Campos tem crescido consideravelmente nos últimos cinco anos. Conforme levantamento do DENATRAN relativo à Junho de 2017, a cidade apresentava 418.341 veículos motorizados, dos quais 289.946 são automóveis. Já no ano de 2013, o mesmo levantamento apontou que o número de automóveis era de 264.856, o que representa um crescimento de cerca de 9,47% deste veículo. A Figura 5 representa o crescimento no número de automóveis para os cinco anos, sendo que os dados de 2017 são parciais referentes ao primeiro semestre.

Figura 5 – Evolução no Número de Automóveis em São José dos Campos

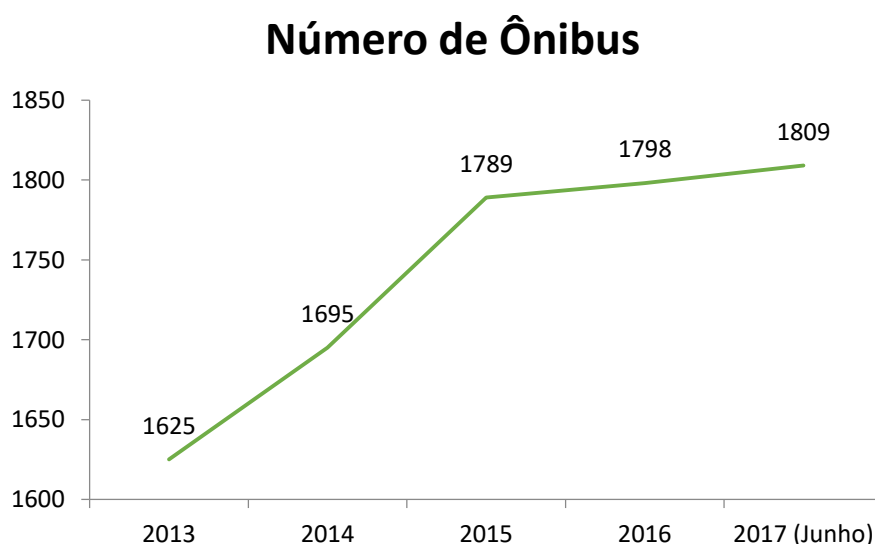


Fonte: DENATRAN (2017)

O mesmo levantamento do DENATRAN (2017) ainda apresenta os dados de crescimento no número de ônibus na cidade para o mesmo período, Figura 6. Considerando o período entre 2013 e o primeiro semestre de 2017, é possível notar um crescimento de 11,32%

na frota de ônibus da cidade. Porém, também é evidente que o comportamento de crescimento do número de ônibus é mais acentuado no período entre 2013 e 2015, representando 10,09%. Enquanto isso, o crescimento de 2015 a 2017 é somente de 1,12%.

Figura 6 – Evolução no Número de Ônibus em São José dos Campos



Fonte: DENATRAN (2017)

A bicicleta, por sua vez, ainda apresenta uma baixa utilização como modal de transporte na cidade de São José dos Campos. Segundo dados da Pesquisa Origem Destino (IPPLAN, 2014), a bicicleta representava somente 2,58% de todas as viagens ocorridas na cidade, estando abaixo da média nacional para cidades entre 500 mil e 1 milhão de habitantes, de 2,68% das viagens.

Em Março de 2016, a Prefeitura de São José dos Campos publicou a Lei Complementar N° 576 para instituir a Política Municipal de Mobilidade Urbana, que põe em prática o Plano de Mobilidade de São José dos Campos, também conhecido como “PlanMob SJC”. O Plano de Mobilidade, elaborado no ano de 2015, contou com consultas públicas para entender as necessidades dos habitantes da cidade e tem como um de seus objetivos alterar a matriz modal da cidade, incentivando o uso de modais coletivos e não motorizados.

Apesar da instituição da Política de Mobilidade Urbana, até o momento, a cidade não possui um sistema de compartilhamento de bicicletas. A elaboração de um programa nesses moldes contribuiria não somente para a promoção de atividades físicas e de lazer, mas também para o incentivo à utilização da bicicleta como um modal de transporte diário.

Para colaborar com o incentivo ao uso da bicicleta como modal de transporte diário, o modelo elaborado a partir da revisão da literatura será alimentado com informações de uma região amostral da cidade de São José dos Campos. Com base nessas informações, o modelo irá definir quais os melhores locais para se instalar as estações de *bike sharing* e os tamanhos dessas estações.

Figura 7 – Estação de *Bike Sharing* “Citi Bike” na Cidade de Nova Iorque



Fonte: ITDP (2014)

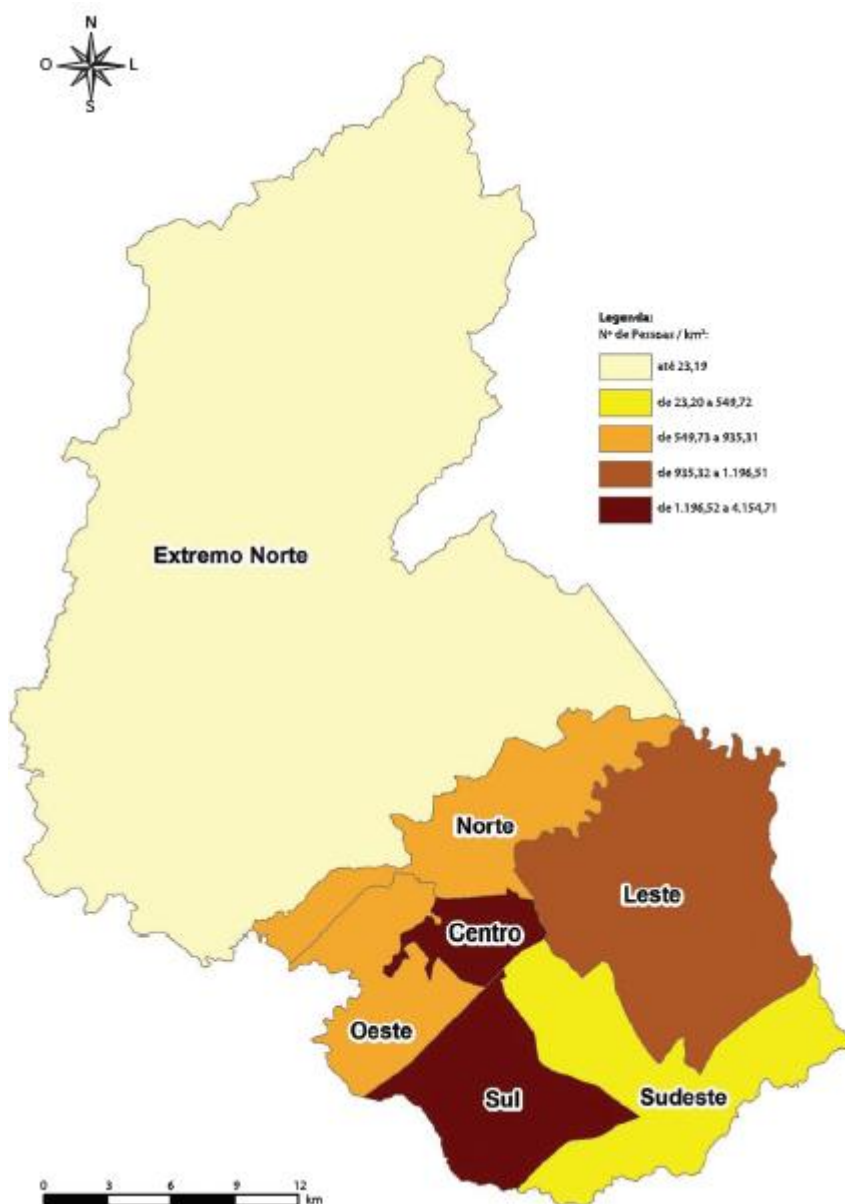
É importante destacar que, para o planejamento desse sistema de bicicletas compartilhadas em São José dos Campos, estão sendo consideradas estações simples, como as apresentadas na Figura 7. Elas são compostas por uma base de suporte, um totem para atendimento, espaços para acoplagem com trava de segurança e as bicicletas propriamente ditas. Espaços extras como vestiários e armários para retirada de capacetes demandam uma área maior para implantação e não estão sendo considerados no desenvolvimento do modelo.

4.2 DEFINIÇÃO DA REGIÃO DE TRABALHO

A divisão da cidade de São José dos Campos em macrozonas foi uma proposta para auxiliar na análise de dados da Pesquisa Origem Destino, conduzida pelo IPPLAN em 2011. Desse modo, a cidade foi dividida entre sete macrozonas, adaptadas do seu Plano Diretor: Centro, Leste, Oeste, Sul, Sudeste, Norte e Extremo Norte. Nesse agrupamento, foram considerados bairros com características físicas, demográficas e de transporte similares.

A Figura 8 apresenta o mapa do município dividido entre as sete macrozonas e destaca a densidade demográfica de cada uma delas, que constitui um importante critério de segmentação das regiões.

Figura 8 – Divisão da Cidade de São José dos Campos em Macrozonas



Fonte: IPPLAN (2015)

Para o levantamento dos dados que irão alimentar o modelo, foi definida apenas uma amostra da cidade como região de trabalho, visto que a implantação inicial do sistema de *bike sharing* em toda área urbana elevaria, consideravelmente, os custos e colocaria a qualidade do

seu funcionamento em risco. Com isso, uma amostra da macrozona “Centro” foi escolhida para o desenvolvimento do estudo.

A macrozona “Centro”, com apenas 18,68 km² de área, é a menor das sete divisões territoriais do município. Segundo o IBGE (2010), a região registrou 72.115 habitantes, representando a segunda maior macrozona em densidade demográfica do município. Por essas questões, a região também é considerada a segunda maior em viagens ao se somar todos os modais, com aproximadamente 364.745 viagens originadas diariamente, sendo que 3.262 destas são realizadas utilizando o modal bicicleta.

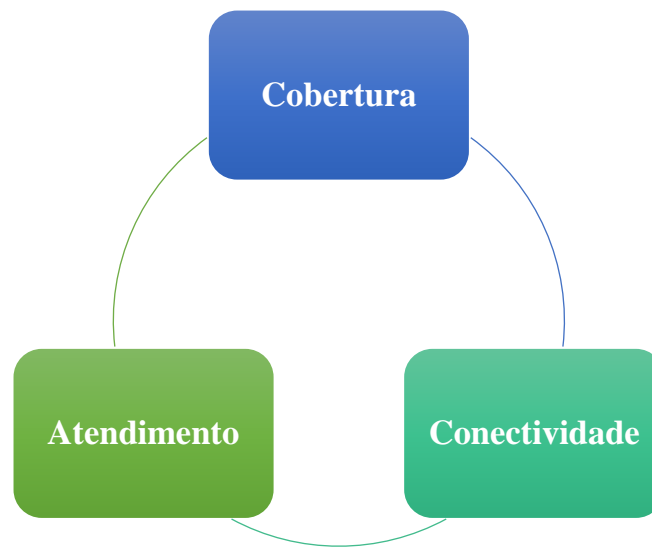
A Pesquisa Origem Destino (2014) ainda mostra que esta macrozona concentra o maior número de empregos, principalmente em comércio e serviços. Ao aliar a oferta de empregos com a alta densidade demográfica, a macrozona torna-se ideal para a implantação do sistema de bicicletas compartilhadas, visto que o usuário é capaz de utilizar a bicicleta para fins de transporte cotidiano e não somente para lazer.

4.3 INDICADORES

Para o desenvolvimento do modelo, foi necessário definir indicadores, a partir de subsídios da literatura, que representassem os benefícios que se pretende atingir com a resolução do problema. Neste caso, os indicadores foram baseados, principalmente, nos resultados obtidos por Fishman et al. (2014). Em seu trabalho, é possível identificar que as principais barreiras para a utilização dos sistemas de *bike sharing* são a ausência de estações próximas às residências, aos locais de trabalho e de lazer.

Desse modo, foram definidos três indicadores principais para o problema, que apresentam intensa relação entre si, conforme apresentado na Figura 9. Estes indicadores são componentes da função objetivo do modelo de programação linear. Com isso, a estrutura deste modelo foi desenvolvida, a fim de atender às necessidades propostas por cada indicador.

Figura 9 – Indicadores para Embasamento do Modelo



Fonte: Próprio autor (2017)

Cada um dos indicadores propostos representa um conceito que integra o benefício total do modelo. O indicador denominado “Cobertura” representa o quanto as estações definidas na resolução do modelo são capazes de abranger a área analisada da cidade e a uma distância limite entre si, permitindo que o sistema opere adequadamente. Já “Atendimento” está diretamente relacionado à “Cobertura”, pois trata da população que é possível ser atendida pelas estações de *bike sharing*. Por fim, “Conectividade” é um indicador essencial para a operação do modelo, visto que trata da proximidade das estações aos pontos de ônibus, o que permite que o sistema integre-se a outro modal, concedendo maior mobilidade aos usuários.

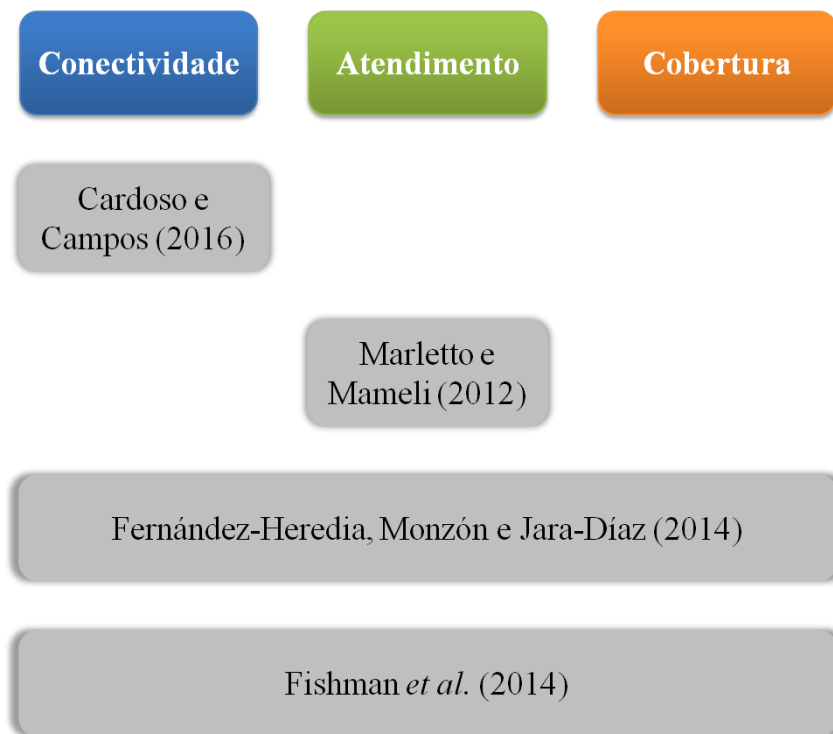
A Figura 10 apresenta a relação entre cada um dos indicadores definidos para o modelo matemático e a literatura revisada no tópico 2.3.3., referente ao segundo capítulo. Os autores apresentados abordam direta ou indiretamente cada um dos indicadores, seja por meio de *surveys* ou da observação do comportamento dos usuários de sistemas de bicicletas semelhantes.

Os trabalhos de Fishman et al. (2014) e Fernández-Heredia, Monzón e Jara-Díaz (2014) apresentam pesquisas com usuários de sistemas de *bike sharing* da Austrália e da Espanha, respectivamente. Por desenvolverem abordagens mais completas a respeito do

comportamento dos ciclistas, é possível notar que os três indicadores são identificados ao longo dos trabalhos.

Além do conceito já exposto de cada um dos indicadores, sua recorrência na literatura recente reforça a necessidade de abordagem para resolução do problema, visto que envolvem decisões que influenciam no comportamento dos usuários em potencial.

Figura 10 – Relações dos Indicadores com a Literatura



Fonte: Próprio autor (2017)

4.4 DESENVOLVIMENTO DO MODELO

Índices

- i indica os nós;
- l indica o tamanho da estação;
- n indica um ponto de referência;
- s indica um local de interesse;

Parâmetros

AC_{in} indica se a estação em i atende o ponto de referência n (binário);

BS_i indica se o nó i é candidato a ser estação (binário);

BA indica o orçamento (R\$) disponível para construção do sistema de *bike sharing*;

CE_l indica o custo (R\$) para construção de cada tipo de estação l ;

O_i indica a existência de pontos de ônibus ao redor do nó i ;

POP_i indica a quantidade de aproximada habitantes no raio de cobertura de i ;

M_{is} indica se o nó i atende um ponto de interesse s (binário);

Variáveis de Decisão

X_{il} indica se o nó i receberá uma estação l

Y_s indica se o local de interesse s é atendido

W indica o benefício que deverá ser maximizado

Função Objetivo é dada por Maximizar W :

Cobertura + Atendimento + Conectividade

1. Max $W =$

$$\sum_{i=1}^I \sum_{n=1}^N \sum_{l=1}^3 AC_{in} X_{il} + \sum_{i=1}^I \sum_{s=1}^{10} POP_i Y_s + \sum_{i=1}^I \sum_{l=1}^3 O_i X_{il}$$

Restrições

2. Valor total para obras (BA):

$$\sum_{i=1}^I \sum_{l=1}^3 CE_l X_{il} \leq BA$$

3. Só receber um tamanho de estação l por nó i:

$$\sum_{l=1}^3 X_{il} \leq BS_i \quad \forall i$$

4. Prioriza o atendimento dos nós atrativos:

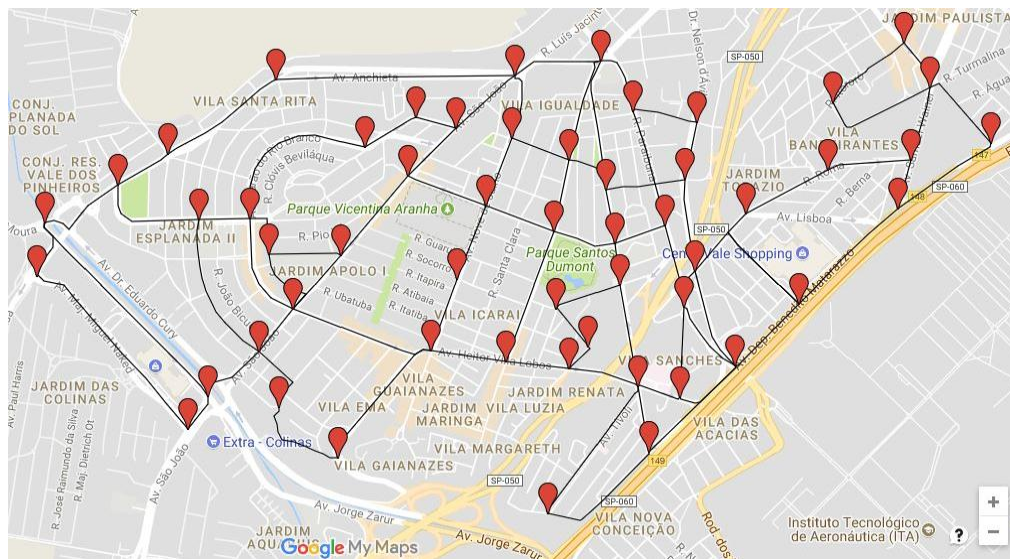
$$\sum_{i=1}^I \sum_{l=1}^3 X_{il} * M_{is} \geq Y_s \quad \forall s$$

4.5 APRESENTAÇÃO DOS PARÂMETROS E DADOS

A fim de validar o modelo construído e produzir uma solução ótima para o problema, é necessário levantar dados de entrada para esse modelo. Para tanto, são realizadas análises da região amostral da cidade, bem como de documentos, que possam fornecer informações que estejam em consonância com os parâmetros.

Para a análise gráfica da cidade, utilizou-se a ferramenta *My Maps* disponibilizada pelo *Google Maps*. Primeiramente, foi necessário localizar e mapear a amostra da macrozona “Centro” que seria utilizada como área de trabalho. Essa região foi demarcada por cinquenta e quatro nós, representado por pontos vermelhos. A Figura 11 apresenta a região de trabalho da cidade, demarcada por nós e *links* que servirão como referência para o resultado do modelo. É importante ressaltar que os nós também constituem os possíveis locais de instalação de estações de *bike sharing*.

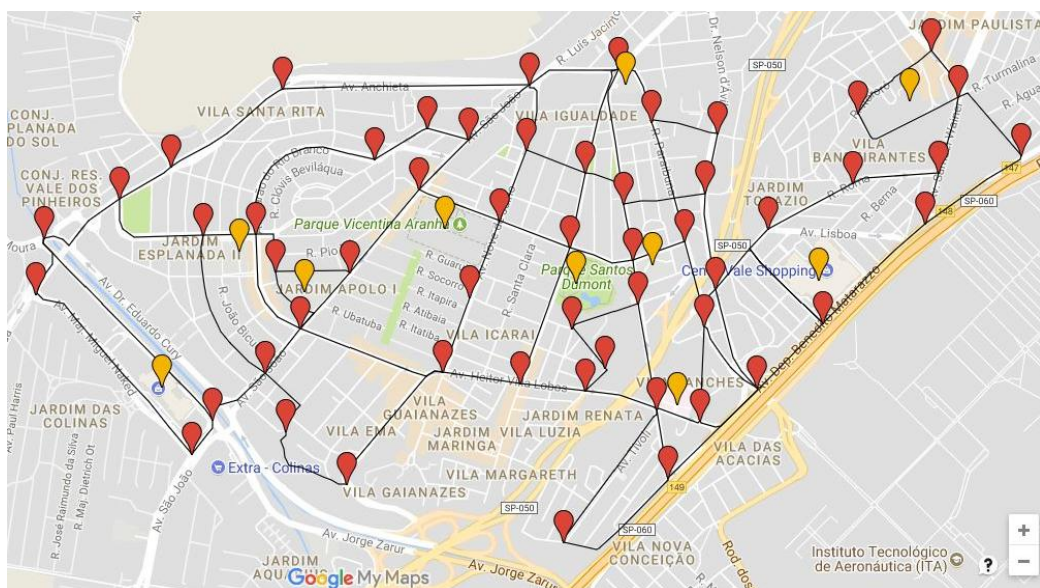
Figura 11 – Mapeamento da Região de Trabalho por Nós e Links



Fonte: Próprio autor com a ferramenta My Maps (2017)

Em seguida, foram definidos no mapa os possíveis locais de interesse pelos usuários do sistema, representados por nós de cor amarela, conforme ilustrado na Figura 12. Para esses locais é suposto que haverá um maior fluxo de pessoas, por conta de sua atratividade, seja por lazer, estudo, trabalho ou necessidades básicas. Os dez pontos que foram definidos como locais de interesse para a cidade estão descritos na Tabela 1.

Figura 12 – Definição dos Locais de Interesse na Região de Trabalho



Fonte: Próprio autor com a ferramenta My Maps (2017)

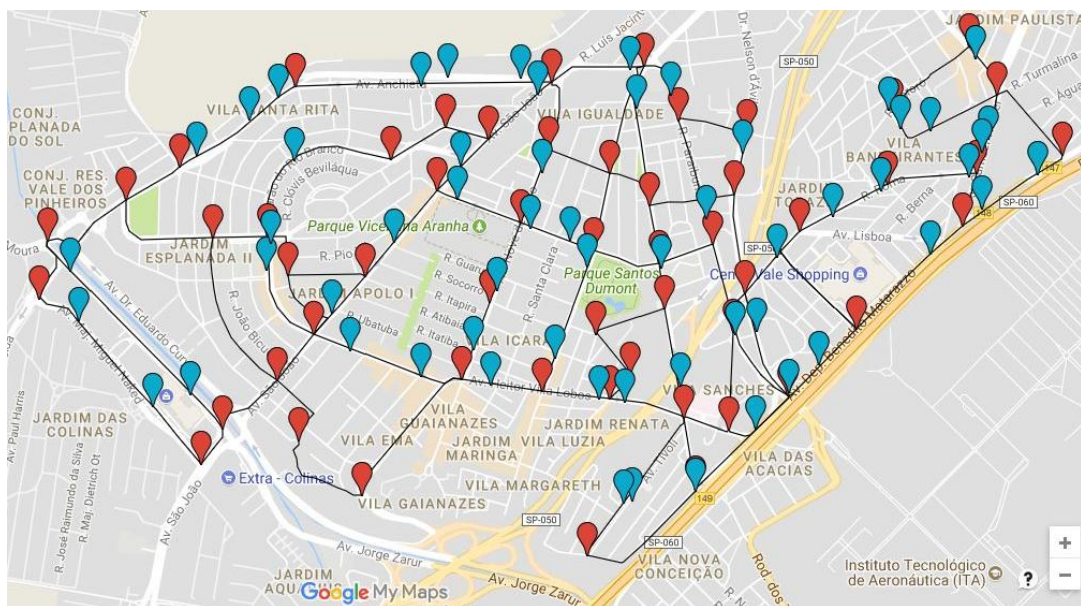
Tabela 1 – Denominação dos Pontos de Interesse em São José dos Campos

Pontos de Interesse	Nomes
1	Colinas Shopping
2	Etep Faculdades
3	Instituto São José/Alpha Lumen
4	Parque Vicentina Aranha
5	Parque Santos Dummond/SESC
6	UNIVAP
7	UNESP
8	Complexo Hospitalar
9	Center Vale Shopping
10	Rodoviária

Fonte: Próprio Autor (2017)

No mapa, ainda foram coletados dados referentes aos pontos de ônibus, a fim de estabelecer a conectividade com o sistema de *bike sharing* a ser implantado. Para tanto, foram marcados com pontos azuis os locais nos quais havia pontos de ônibus construídos sobre os *links* de referência. A distribuição dos pontos é ilustrada na Figura 13, apresentando um equilíbrio de sua quantidade em toda a área amostral.

Figura 13 – Definição dos Pontos de Ônibus na Região de Trabalho



Fonte: Próprio autor com a ferramenta My Maps (2017)

Analisando a malha da região com a demarcação dos pontos de ônibus, foi criada uma tabela com a quantidade destes pontos sobre cada *link*. Essa informação é relevante, uma vez que se torna possível analisar o número de pontos de ônibus nas proximidades de um nó candidato a receber uma estação de *bike sharing*. A Tabela 2 apresenta um trecho da tabela completa sobre a quantidade de pontos de ônibus em cada *link*. Já a Tabela 3 apresenta as respectivas quantidades totais de pontos de ônibus por nó.

Tabela 2 – Quantidade de Pontos de Ônibus por *Link* até o Décimo Nó

Quant.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0	2	x	0	x	x	x	x	x	x
2	2	0	0	x	x	x	x	x	x	x
3	x	0	0	2	x	x	x	x	x	x
4	0	x	2	0	0	x	x	x	x	x
5	x	x	x	0	0	0	x	x	x	0
6	x	x	x	x	0	0	1	1	2	x
7	x	x	x	x	x	1	0	0	x	x
8	x	x	x	x	x	1	0	0	1	x
9	x	x	x	x	x	2	x	1	0	0
10	x	x	x	x	0	x	x	x	0	0

Fonte: Próprio Autor (2017)

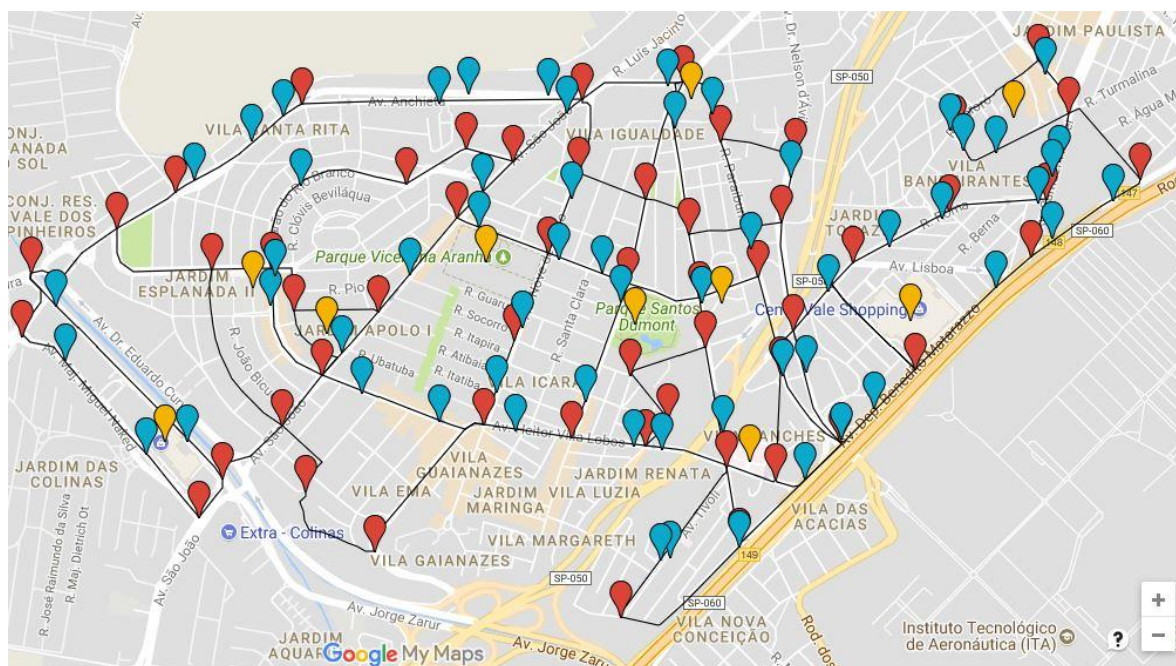
Tabela 3 – Quantidade de Pontos de Ônibus nas Proximidades dos Dez Primeiros Nós

Nó	Pontos de Ônibus
1	2
2	2
3	2
4	2
5	0
6	6
7	2
8	2
9	4
10	0

Fonte: Próprio Autor (2017)

Desse modo, obteve-se o mapa completo com as informações que foram coletadas para a resolução do problema. A Figura 14 apresenta a distribuição dos pontos, nós e links no mapa, identificados por suas cores.

Figura 14 – Região de Trabalho Completa para Resolução do Problema



Fonte: Próprio autor com a ferramenta My Maps (2017)

Além dos dados coletados a partir da análise do mapa da cidade, com o auxílio da ferramenta *My Maps*, também foram estudados documentos relativos a planejamento de sistemas de *bike sharing*. Como a cidade de São José dos Campos ainda não possui um sistema similar em operação foi necessário realizar estimativas para certos dados.

O documento *The Bike-Share Planning Guide* (ITDP, 2014) apresenta informações que funcionam como guia de planejamento de sistemas de *bike sharing*, a partir da análise comparativa de outros sistemas em funcionamento no mundo. Desse modo, partindo-se das premissas presentes no documento entendeu-se que seria mais adequado estimar cerca de dez estações de bicicletas por quilômetro quadrado, além da relação de trinta bicicletas para cada mil habitantes.

De acordo com dados da Pesquisa Origem Destino (2014), sabe-se que a densidade demográfica da macrozona "Centro" é de 3.860,55 habitantes por quilômetro quadrado e que a área aproximada da região de trabalho é de 4,13 km², tem-se que a população aproximada da

região é de 16.000 habitantes. Com isso e as estimativas anteriores, determina-se que o sistema deverá contar com cerca de 480 bicicletas, divididas em 40 estações, resultando em uma média de doze bicicletas por estação.

A partir dessas informações, é possível definir três tamanhos padrões para as estações de *bike sharing*. Como uma estação com doze bicicletas foi dada como média, definiu-se um valor abaixo e um valor acima para elas, conforme a Tabela 4. Além disso, ainda é posto que, em geral, para cada bicicleta é necessário haver o dobro de espaços de alocação, a fim de garantir uma boa operação do sistema.

Tabela 4 – Dimensionamento Padrão das Estações de *Bike Sharing*

	Bicicletas	Espaços
Pequena	10	20
Média	12	24
Grande	15	30

Fonte: Próprio Autor (2017)

Ainda de acordo o guia do ITDP (2014), o custo para a implantação do sistema de compartilhamento de bicicletas carioca, conhecido como “Bike Rio”, foi de US\$ 1.810,00 para cada bicicleta. A análise de custos feita pelo guia inclui todos os custos decorrentes de itens físicos, como as bicicletas, as estações e os equipamentos eletrônicos de monitoramento, e também de serviços, como o planejamento, a instalação e a operação. Por fim, os custos totais são rateados pelo número de bicicletas do sistema, a fim de criar uma unidade para esse custo.

Como o sistema a ser implantado na cidade de São José dos Campos é novo, não é possível obter informações precisas sobre os custos de ativos e de serviços para o sistema. Assim, pode-se estimar que os custos para o sistema em São José dos Campos seriam similares aos do Rio de Janeiro. Neste caso, foi utilizada a seguinte conversão monetária aproximada:

$$1 \text{ USD} = 3,2 \text{ BRL}$$

A Tabela 5 apresenta os custos envolvidos para a implantação das estações de *bike sharing*, de acordo com os seus possíveis tamanhos determinados.

Tabela 5 – Estimativa de Custos para a Construção dos Três Tamanhos de Estações

	Bicicletas	Espaços	Custo USD	Custo BRL
Pequena	10	20	\$ 18.100,00	R\$ 57.920,00
Média	12	24	\$ 21.720,00	R\$ 69.504,00
Grande	15	30	\$ 27.150,00	R\$ 86.880,00

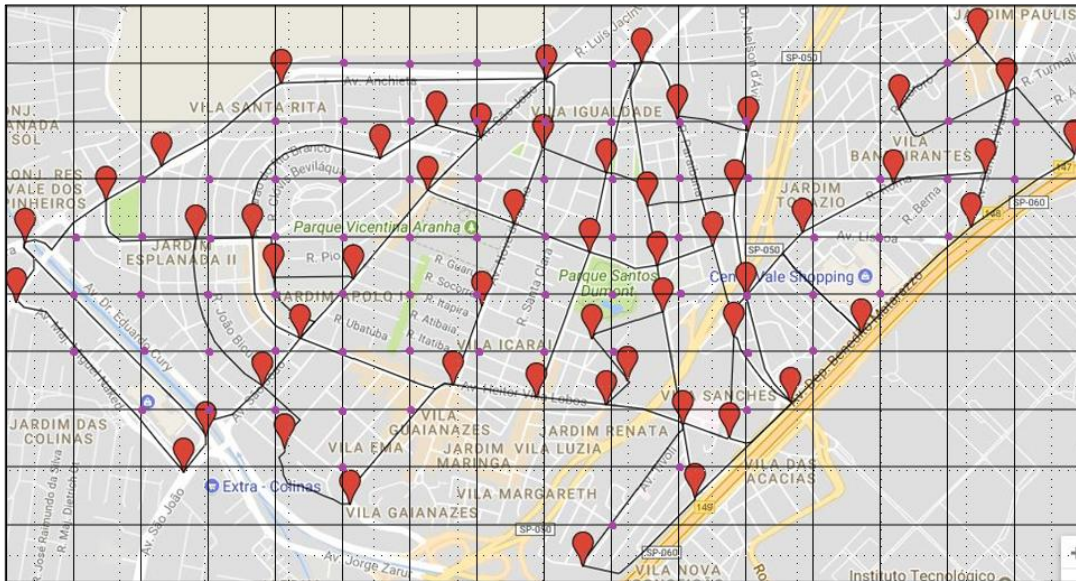
Fonte: Próprio Autor (2017)

Quanto à área de cobertura de cada estação, foi considerada uma abrangência de 400 metros de raio, que representa o valor médio do intervalo apresentado em Lin e Yang (2011). Este raio de cobertura representa uma distância limite entre as estações de *bike sharing* e os locais de origem ou destino da viagem, ou seja, trata-se da distância máxima que o usuário terá que caminhar para iniciar uma viagem de bicicleta ou para chegar a seu local de destino, após finalizar uma viagem utilizando o sistema.

Desse modo, para a abordagem da cobertura da região de trabalho, foram utilizados pontos de referência determinados nas intersecções de linhas de grade desenhadas sobre o mapa, conforme Figura 15. Foram definidos 75 pontos de referência, identificados pela contagem dos pontos por linha, de cima para baixo, da esquerda para a direita.

Com isso, foram analisados quais pontos de referência poderiam ser atendidos por cada um dos nós, considerando-se um raio de 400 metros. A partir dos dados binários levantados, foi possível construir uma tabela relacionando a cobertura dos 75 pontos pelos 54 nós, de acordo com o trecho apresentado na Tabela 6.

Figura 15 – Definição dos Pontos de Referência para Cobertura da Área



Fonte: Próprio autor com a ferramenta My Maps (2017)

Tabela 6 – Distribuição dos Pontos de Referência pelos Nós Próximos

n\i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	1	1
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0

Fonte: Próprio Autor (2017)

Por fim, para realizar a análise da quantidade aproximada de habitantes na área coberta por uma estação, utilizou-se um cálculo baseado na densidade demográfica da macrozona “Centro”. Para tanto, primeiramente, levantou-se a área da região de trabalho poderia ser coberta por cada estação, considerando um raio de 400 metros. Desse modo, foi possível calcular a população aproximada que seria atendida pelas estações, relacionando a área à

densidade demográfica. A Tabela 7 apresenta os dados de população relativos aos dez primeiros nós.

Tabela 7 – População Aproximada ao Redor dos Dez Primeiros Nós

Nó	Área (km²)	População Aproximada
1	0,126	485
2	0,126	485
3	0,251	970
4	0,251	970
5	0,503	1941
6	0,503	1941
7	0,503	1941
8	0,503	1941
9	0,503	1941
10	0,503	1941

Fonte: Próprio Autor (2017)

5 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Com os dados coletados, com base em estimativas feitas a respeito da cidade, foi possível implementar o modelo matemático desenvolvido. Para tanto, é considerado como restrição, previamente à execução do modelo, que só é possível construir uma estação de *bike sharing* em nós onde houver ao menos uma conexão por uma ciclovía ou ciclofaixa.

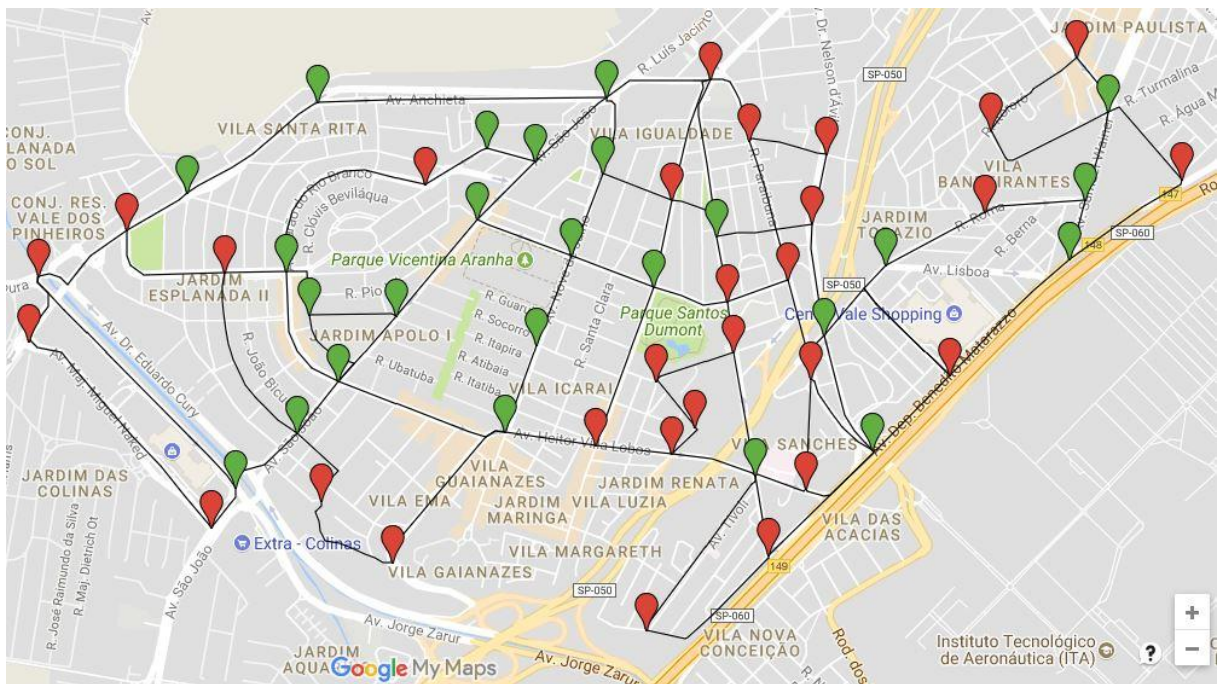
Desse modo, primeiramente, foi resolvido o modelo matemático de programação linear elaborado durante o projeto de Iniciação Científica, com a colaboração do Me. Stefano Petrini de Oliveira. Com isso, notou-se que o nó 48 seria o único sem a possibilidade de receber uma estação de *bike sharing*. Os demais nós compunham a malha cicloviária, com a conexão feita por ao menos uma das suas vias de intersecção.

Com o resultado desse modelo prévio, foi possível fornecer dados para o parâmetro BS_i , que indica se um nó i é candidato a receber uma estação de *bike sharing*. Essas informações tornaram o modelo matemático para *bike sharing* completo e apto a ser executado.

O modelo elaborado neste trabalho foi implementado utilizando a IDE GAMS, versão 24.1, com o solver CPLEX. Para a resolução, foi considerado, no parâmetro constante BA, um orçamento de R\$ 1.500.000,00 para a construção do sistema completo. O resultado obtido é apresentado na Figura 16, na qual os nós escolhidos para receberem estações de *bike sharing* estão destacados em verde.

É possível observar que foram escolhidos vinte e cinco nós para receber as estações de bicicletas dentro do orçamento proposto. Porém, a distribuição dessas estações sobre a região de trabalho é irregular, havendo uma maior concentração do lado esquerdo do mapa. Ainda é necessário ressaltar que algumas dessas estações localizadas a distâncias pequenas entre si, ou seja, menores que 400 metros, distância definida como o raio de cobertura de uma estação. Desse modo, entende-se que a operação do sistema será mais intensa em algumas regiões, que em outras.

Figura 16 – Resultado Gerado com a Implementação do Modelo Matemático



Fonte: Próprio autor com a ferramenta My Maps (2017)

Para a construção desse modelo, foram considerados três indicadores principais: Cobertura, Atendimento e Conectividade. Entretanto, um fator imprescindível que pode ser observado nas restrições do modelo são os Custos. Desse modo, esse fator também poderia ser considerado como um indicador da Função Objetivo do modelo matemático. Assim, destaca-se que essa Função Objetivo pode ser ajustada, dependendo dos indicadores que pretende resultar como benefício na elaboração do sistema.

É importante destacar que há uma proporcionalidade entre a Cobertura e os Custos, ou seja, quanto maior a cobertura proporcionada na região de trabalho, maiores os custos. Desse modo, é necessário maximizar a cobertura e minimizar os custos, criando um contraponto entre os dois indicadores.

Sendo assim, é possível ajustar o modelo para refletir na Função Objetivo os indicadores que se pretende atender. Assim, o modelo pode ser construído com foco em maximização da cobertura, minimização dos custos ou ambos, simultaneamente. Para o último caso, é importante destacar que, dependendo do orçamento estipulado, é possível que o modelo retorne a impossibilidade de atender a Função Objetivo.

Considerando que o modelo seja adaptado para estabelecer o *set covering*, ou seja, a abrangência total da área de trabalho pelas estações, é necessário que o indicador Cobertura torne-se uma restrição do modelo matemático. Desse modo, a Função Objetivo trata-se da maximização apenas dos indicadores Atendimento e Conectividade. Enquanto isso, a Cobertura é entendida como a necessidade de cada ponto de referência ser atendido por, pelo menos, uma estação de *bike sharing*.

Dado que os índices e parâmetros definidos inicialmente não são alterados, o modelo matemático passa a ser ajustado da seguinte forma:

Função Objetivo é dada por Maximizar W:

Atendimento + Conectividade

1. Max W =

$$\sum_{i=1}^I \sum_{s=1}^{10} POP_i Y_s + \sum_{i=1}^I \sum_{l=1}^3 O_i X_{il}$$

Restrições

2. Valor total para obras (BA):

$$\sum_{i=1}^I \sum_{l=1}^3 CE_l X_{il} \leq BA$$

3. Só receber um tamanho de estação l por nó i:

$$\sum_{l=1}^3 X_{il} \leq BS_i \quad \forall i$$

4. Prioriza o atendimento dos nós atrativos:

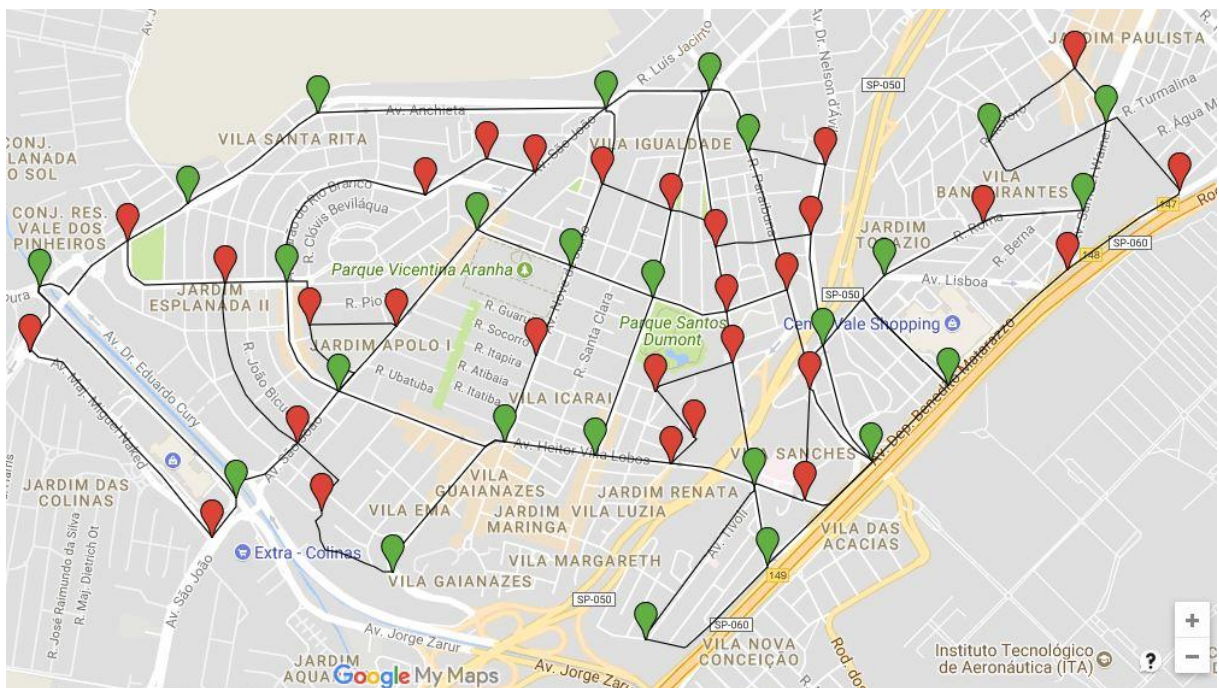
$$\sum_{i=1}^I \sum_{l=1}^3 X_{il} * M_{is} \geq Y_s \quad \forall s$$

5. Cada ponto de referência n deve ser coberto por ao menos uma estação i :

$$\sum_{i=1}^I \sum_{l=1}^3 AC_{in} X_{il} \geq 1 \forall n$$

Com a implementação do modelo ajustado, considerando os mesmos dados do modelo inicial, obtém-se uma nova solução para o problema, com foco em *set covering*. A Figura 17 apresenta o resultado obtido, obedecendo ao mesmo código de cores utilizado anteriormente.

Figura 17 – Resultado do Modelo Adaptado com Foco em *Set Covering*



Fonte: Próprio autor com a ferramenta My Maps (2017)

Para este segundo caso, também são escolhidos vinte e cinco nós para receberem estações de *bike sharing*, visto que o orçamento para construção do sistema foi o mesmo. Entretanto, ao analisar a distribuição destas estações pela região de trabalho, nota-se que elas estão localizadas de modo mais uniforme e, em geral, há uma distância maior entre elas. Dessa forma, o sistema pode alcançar a um maior número de usuários dentro do raio de cobertura de suas estações.

É importante destacar que, em ambos os resultados gerados, será possível atender todos os locais de interesse escolhidos na amostra da cidade.

A adaptação do modelo por meio da estratégia do *set covering* é interessante, uma vez que força o modelo a realizar a cobertura de toda sua área de trabalho. Como já destacado, caso o orçamento não seja suficiente, essa abordagem pode resultar na inviabilidade da implantação do sistema, o que o torna particularmente interessante para o caso de operações de transporte.

A respeito do dimensionamento das estações de *bike sharing*, obteve-se apenas o tamanho P como resultado para os dois casos analisados. Com isso, cada estação contará com dez bicicletas para utilização, que irão variar ao longo de sua operação. Esse resultado para a dimensão das estações é uma limitação do modelo elaborado para resolver o problema, visto que é focado somente no custo envolvido na construção de cada tamanho de estação.

6 CONCLUSÃO

Ao final da análise do desenvolvimento do modelo matemático de programação linear, é possível afirmar que os objetivos traçados para este trabalho foram atingidos. Os três objetivos específicos foram abordados com clareza durante as etapas da resolução do problema, sendo o levantamento dos dados relativos à cidade de São José dos Campos, a construção do modelo matemático propriamente dito e a apresentação gráfica dos resultados do problema. Com isso, tem-se também que o objetivo geral do trabalho foi atingido, por meio da definição dos locais das estações e suas dimensões.

Apesar do êxito na resolução do problema proposto, é necessário reconhecer que há limitações no modelo matemático desenvolvido. Como a cidade ainda não apresenta um sistema de compartilhamento de bicicletas em operação há uma indisponibilidade de dados mais acurados para alimentação dos parâmetros do modelo, tornando-se necessária a realização de estimativas para obtenção desses valores.

Além disso, a ausência de dados reais como a demanda por viagens de bicicleta em cada ponto impossibilitou a atribuição de um benefício aos diferentes tamanhos de estações de *bike sharing*. Assim, o modelo acabou analisando o dimensionamento apenas como um custo envolvido, uniformizando a quantidade de bicicletas para cada estação.

Outro fator que pode ser entendido como uma limitação na análise do problema foi a necessidade de se trabalhar com indicadores existentes na literatura. Esses indicadores, embora sejam bastante abrangentes, não refletem as reais necessidades dos usuários potenciais da cidade no benefício da Função Objetivo do modelo.

Em contrapartida, essas limitações também representam oportunidades de desenvolvimento de trabalhos futuros. Para o caso do levantamento de indicadores, por exemplo, é possível realizar pesquisas voltadas ao entendimento das necessidades da cidade, a partir de *surveys* com ciclistas e futuros usuários do sistema.

Ainda sobre oportunidades de trabalhos futuros, é possível desenvolver pesquisas em diversos campos de estudo, como por exemplo, a análise da demanda por viagens focadas em modais sustentáveis, a previsão orçamentária e os custos reais para construção do sistema e a influência da topografia da cidade no posicionamento das estações no espaço urbano.

Conforme apresentado no desenvolvimento do trabalho, também há a oportunidade da estruturação de um modelo combinado para a definição da malha cicloviária e das estações de *bike sharing*.

A mobilidade urbana sustentável é um tema que apresenta grande relevância nos últimos anos, com um amplo espectro de subtemas e com a possibilidade de aplicação prática. Estudos relativos ao planejamento de sistemas de compartilhamento de bicicletas ainda podem ser muito explorados, principalmente, no Brasil. As operações desses sistemas apresentam inúmeras deficiências que podem ser sanadas com estudos aprofundados em diversos temas que as compõe.

É notável que a realização de estudos a respeito do tema proporciona contribuição tanto científica, como aplicada. A literatura nacional sobre o tema de mobilidade urbana, voltado para o uso de bicicletas como meio de transporte diário, ainda é escassa, principalmente ao se abordar o planejamento e a gestão desses sistemas. Os estudos podem ainda fornecer um importante suporte para cidades que pretendem desenvolver sistemas similares e obter sucesso em sua operação, ou que pretendem ajustar os sistemas já existentes, a fim de atrair um maior número de usuários.

REFERÊNCIAS

- AMANN, E. et al. Infrastructure and its role in Brazil's development process. **The quarterly review of economics and finance**, Illinois, v. 62, n. 4, p. 66-73, nov. 2016.
- ARENALES, M. et al. **Pesquisa operacional**. Rio de Janeiro: Campus/Elsevier, 2007. 524 p.
- ASHAKARI, E; BASHIRI, M. Design of a public bicycle-sharing system with safety. **Computational and applied mathematics**, Theran, v. 36, n. 2, p. 1023-1041, jun. 2017.
- BAUMAN, A. et al. The unrealised potential of bike share schemes to influence population physical activity levels: a narrative review. **Preventive medicine**, Article in Press, 2017.
- BRYMAN, A. **Research methods and organization studies**. London: Unwin Hyman, 1989. 283 p.
- BULLOCK, C.; BRERETON, F.; BAILEY, S., The economic contribution of public bike-share to the sustainability and efficient functioning of cities. **Sustainable cities and society**, Dublin, v. 28, n.1, p. 76-87, jan. 2017
- CARDOSO, P.; CAMPOS, V. Metodologia para planejamento de um sistema ciclovário. **Transportes**, São Paulo, v. 24, n. 4, p. 39-48, dez. 2016.
- CASTILLO-MANZANO, J. et al. Going a long way? On your bike! Comparing the distances for which public bicycle sharing system and private bicycles are used. **Applied geography**, Seville, v. 71, p. 95-105, jun. 2016.
- CAUFIELD, B., et al. Examining usage patterns of a bike-sharing scheme in a medium sized city. **Transportation research part A**, Dublin, v. 100, p. 152-161, jun. 2017.
- CITY BIKES. **Bike sharing networks around the world**. Disponível em: <<https://citybik.es/>>. Acesso em: 05 out. 2017.
- CRUZ, F. et al. A heuristic algorithm for a single vehicle static bike sharing rebalancing problem. **Computers & operations research**, v. 79, n. 3, p. 19-33, mar. 2017.
- DELL'AMICO, M. et al. The bike sharing rebalancing problem: mathematical formulations and benchmark instances. **Omega**, v. 45, n. 6, p. 7-19, jun. 2014.
- DENATRAN, Departamento nacional de trânsito. **Frota de veículos**. Disponível em: <<http://www.denatran.gov.br/estatistica/237-frota-veiculos/>>. Acesso em: 25 set. 2017.
- FERNÁNDEZ-HEREDIA, A.; JARA-DÍAZ, S.; MONZÓN, S. Understanding cyclists' perceptions, keys for a successful bicycle promotion. **Transportation research part A**, v. 63, n. 5, p. 1-11, may 2014.

FISHMAN, Elliot. Bikeshare: a review of recent literature. **Transport reviews**, Melbourne, v. 36, n. 1, p. 92-113, jan. 2016.

FISHMAN, E. et al. Barriers to bikesharing: an analysis from Melbourne and Brisbane. **Journal of transport geography**, Melbourne, v. 41, n. 8, p. 325-337, dec. 2014.

FISHMAN, E., SCHEPERS, P. Global bike share: what the data tells us about road safety. **Journal of safety research**, Illinois, v. 56, p. 41-45, oct. 2016.

GARCÍA-PALOMARES, J.; GUTIÉRREZ, J.; LATORRE, M. Optimizing the location of stations in bike-sharing programs: a GIS approach. **Applied geography**, Madrid, v. 35, p. 235-246, jul. 2012.

GHOSH, S. et al. Dynamic repositioning to reduce lost demand in bike sharing system. **Journal of artificial intelligence research**, Singapore, v. 58, p. 387-430, feb. 2017.

GOLDBARG, M.; LUNA, H. **Otimização combinatória e programação linear**. 2. ed. Rio de Janeiro: Campus, 2005. 356 p.

IBGE, Instituto brasileiro de geografia e estatística. **Brasil em síntese**. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sp/sao-jose-dos-campos/panorama>>. Acesso em: 18 ago. 2017.

INSTITUTO DE PESQUISA, ADMINISTRAÇÃO E PLANEJAMENTO. **Atlas da pesquisa origem destino: panorama da mobilidade em São José dos Campos**. São Carlos: Editora Cubo, 2014.

INSTITUTE FOR TRANSPORTATION & DEVELOPMENT POLICY. **The Bike-share planning guide**. New York: ITDP, 2014. 150 p. Disponível em: <https://www.itdp.org/wp-content/uploads/2014/07/ITDP_Bike_Share_Planning_Guide.pdf>. Acesso em: 04 abr. 2017.

LIN, J.; YANG, T. Strategic design of public bicycle sharing systems with service level constraints. **Transportation research part E**, v. 47, p. 284–294, 2011.

MARLETTO, G.; MAMELI, F. A participative procedure to select indicator of policies for sustainable urban mobility. outcomes of a national test. **European transport research review**, v. 4, n. 2, p. 79-89, jun. 2012.

MARTINEZ, L. et al. An optimisation algorithm to establish the location of stations of a mixed fleet biking system: an application to the city of Lisbon. **Procedia: social and behavioral sciences**, Lisbon, v. 54, p. 513 – 524, sep. 2012.

MEDDIN, R.; DEMAIO, P. **The bike-sharing world map**. Disponível em: <<http://www.bikesharingworld.com>>. Acesso em: 02 out. 2017.

MIGUEL, P. et al. **Metodologia de pesquisa em engenharia de produção e gestão de operações**. 2. ed. Rio de Janeiro: Campus/Elsevier. 260 p.

PARKES, S. et al. Understanding the diffusion of public bikesharing systems: evidence from Europe and North America. **Journal of transport geography**, Leeds, v. 31, p. 94–103, jun. 2013.

SÃO JOSÉ DOS CAMPOS (Município). **Lei complementar n. 576**, 15 de março de 2016: Política municipal de mobilidade urbana, São José dos Campos, 79 p., 2016.

SHU, J. et al. Models for effective deployment and redistribution of bicycles within public bicycle-sharing systems. **Operations research**, Maryland, v. 61, n. 6, p. 1346-1359, dec. 2013.

YOU, Peng-Sheng; LEE, Pei-Ju; HSIEH, Yi-Chih. An artificial intelligent approach to the bicycle repositioning problems. **Engineering computations**, v. 34 n. 1, p.145-163, 2017.