CEFET/RJ
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO

ESTUDO DO IMPACTO DAS BICICLETAS COMPARTILHADAS NA REDE DE ÔNIBUS DO RIO DE JANEIRO UTILIZANDO ANÁLISE DE REDES SOCIAIS

Patrícia Aurelia de Sousa

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas, do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, CEFET/RJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre.

Orientador: Rafael Garcia Barbastefano
Coorientador: Diego Moreira de Araujo Carvalho

Rio de Janeiro
Agosto de 2018

ESTUDO DO IMPACTO DAS BICICLETAS COMPARTILHADAS NA REDE DE ÔNIBUS DO RIO DE JANEIRO UTILIZANDO ANÁLISE DE REDES SOCIAIS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas, do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, CEFET/RJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre.

Patrícia Aurelia de Sousa

Banca Examinadora:

_____

Presidente, Professor Dr. Rafael Garcia Barbastefano (CEFET/RJ) (orientador)

_____

Professor Dr. Diego Moreira de Araujo Carvalho (CEFET/RJ) (coorientador)

_____

Professor Dr. Eduardo Soares Ogasawara (CEFET/RJ)

_____

Professor Dr. Marcio de Almeida D'Agosto (COPPE/UFRJ)

Rio de Janeiro
Agosto de 2018

CEFET/RJ – Sistema de Bibliotecas / Biblioteca Central

S725 Sousa, Patrícia Aurelia de
Estudo do impacto das bicicletas compartilhadas na rede de ônibus do Rio de Janeiro utilizando análise de redes sociais / Patrícia Aurelia de Sousa.—2018.
120f. + apêndices : il. (algumas color.) , grafs. , tabs. ; enc.

Dissertação (Mestrado) Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca , 2018.
Bibliografia : f. 116-120
Orientador : Rafael Garcia Barbastefano
Coorientador : Diego Moreira de Araujo Carvalho

1. Planejamento urbano. 2. Mobilidade urbana. 3. Ônibus. 4. Transporte público. 5. Bicicletas. 6. Redes sociais. I. Barbastefano, Rafael Garcia (Orient.). II. Carvalho, Diego Moreira de Araujo (Coorient.). III. Título.

CDD 711.4

Elaborada pela bibliotecária Mariana Oliveira CRB-7/5929

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Prof. Dr. Rafael Barbastefano pela oportunidade de ingressar no mestrado com sua orientação. Por todas as sugestões, confiança, apoio, paciência e por compartilhar seus conhecimentos, que foram fundamentais para conclusão deste mestrado.

Ao meu coorientador Prof. Dr. Diego Carvalho pelo suporte concedido, conhecimentos compartilhados e contribuições com minha pesquisa.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro para realização deste trabalho.

Aos meus pais, Sonia e Benedito, pelos conselhos, apoio, confiança e incentivo que foram essenciais durante este mestrado. Obrigada por sempre acreditarem em mim, sendo fundamentais em todas as minhas conquistas.

A minha irmã, Priscilla, por sua amizade, carinho e compreensão. E por sempre estar ao meu lado para me ouvir, ajudar e aconselhar quando preciso.

A todos os professores do mestrado pelos ensinamentos transmitidos no decorrer deste curso.

Aos colegas de mestrado pela troca de conhecimentos e convivência amistosa durante todo este período.

A todos os familiares e amigos que torceram por mim durante este percurso.

RESUMO

Devido à grande importância da mobilidade urbana para o desenvolvimento das cidades, muitos estudos na área de redes sociais têm analisado redes de transporte público. Como é o caso desta dissertação, cujo objetivo consiste em analisar os efeitos da integração das bicicletas compartilhadas do *Bike* Rio com o sistema de ônibus da cidade do Rio de Janeiro. Para realizar esta análise, foram comparadas as propriedades das redes geradas neste estudo, criadas com base no modelo topológico P-*space* utilizado para representar a rede de transporte por ônibus da cidade do Rio de Janeiro. A partir deste modelo foram desenvolvidas redes que integram as bicicletas compartilhadas do *Bike* Rio com os ônibus da cidade. Além disso, também foram elaboradas redes que consideram o deslocamento realizado pelo pedestre entre pontos de ônibus e redes limitadas que analisam apenas as áreas com maior concentração de estações de bicicletas compartilhadas. Os resultados obtidos neste estudo indicam que a utilização das bicicletas compartilhadas proporciona um aumento de aproximadamente 11% no número de deslocamentos possíveis entre os pontos da cidade usando apenas uma linha de ônibus. E um aumento superior a 100% ao considerar apenas as áreas delimitadas, o que indica que se as estações de bicicletas fossem distribuídas por toda a cidade na mesma proporção verificada nas áreas delimitadas, a cidade se tornaria mais conectada. Em todas as redes geradas, foi verificado que para se deslocar de um ponto para outro seriam necessárias no máximo quatro linhas de ônibus. Também foi constatado que os deslocamentos realizados a pé entre pontos de ônibus não geram alterações expressivas nos valores das propriedades da rede de ônibus da cidade.

Palavras-chave: rede de transporte por ônibus; transporte público; P-*space*; análise de redes sociais; *bikeshare*.

ABSTRACT

Due to the great importance of urban mobility for the development of cities, many studies in the area of social networks have analyzed public transport networks. As is the case of this dissertation, whose objective is to analyze the effects of the integration of Bike Rio's shared bikes with the bus system of the city of Rio de Janeiro. In order to perform this analysis, the properties of the networks generated in this study, created based on the topological model P-space applied to represent the bus transport network of the city of Rio de Janeiro, were compared. From this model were developed networks that integrate the Bike Rio's shared bikes with the city buses. In addition, networks that consider the pedestrian's displacement between bus stops and limited networks that only analyze the areas with the highest concentration of bikeshare stations have also been developed. The results obtained in this study indicate that the use of bikeshare provides an increase of approximately 11% in the number of possible displacements between city's bus stops using only one bus line. And an increase of more than 100% considering only the delimited areas, which indicates that if the bicycle stations were distributed throughout the city in the same proportion verified in the delimited areas, the city would become more connected. In all generated networks, it was verified that to move from one bus stop to another, it would be needed a maximum of four bus lines. Also, it was observed that the displacements carried out on foot between bus stops do not generate significant changes in the values of the properties of the city bus network.

Keywords: bus transportation network; public transportation; P-space; social network analysis; bikeshare.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Exemplo de grafo orientado e não-orientado 19
Figura 2 - Modelos topológicos de redes de transporte público. (a) Rede simples de transporte público. (b) L-*space*. (c) B-*space*. (d) P-*space*. (e) C-*space* 27
Figura 3 - Viagens realizadas na cidade do Rio de Janeiro por meio de transporte 35
Figura 4 - Divisão dos meios de transporte no município do Rio de Janeiro 36
Figura 5 - Transporte público na cidade do Rio de Janeiro 36
Figura 6 - Meios de transporte motorizados na cidade do Rio de Janeiro 37
Figura 7 - Quantidade média diária de passageiros na cidade do Rio de Janeiro 38
Figura 8 - Quantidade de veículos no município do Rio de Janeiro em 2016 38
Figura 9 - Consórcios sistema de transporte público de ônibus 39
Figura 10 - Evolução da extensão da malha cicloviária da cidade do Rio de Janeiro 40
Figura 11 - Bicicleta antiga versus Bicicleta atual do *Bike* Rio 51
Figura 12 - Estação antiga versus Estação atual do *Bike* Rio 52
Figura 13 - Mapa cicloviário da cidade do Rio de Janeiro em 2017 53
Figura 14 - Mapa cicloviário da cidade do Rio de Janeiro com status das estações 53
Figura 15 - Mapa das tipologias da malha cicloviária da cidade do Rio de Janeiro 54
Figura 16 - Estrutura metodológica do projeto 55
Figura 17 - Fluxograma do algoritmo desenvolvido 58
Figura 18 - Representação dos modelos topológicos de redes de transporte público 62
Figura 19 - Processo para obtenção do P-*space* Aumentado 63
Figura 20 - P-*space* e estações de bicicletas compartilhadas 64
Figura 21 - Integração do P-*space* com as estações de bicicletas compartilhadas 64
Figura 22 - P-*space* Aumentado 65
Figura 23 - Representação do P-*space* Pedestres 66
Figura 24 - Mapa de calor das estações do *Bike* Rio 67
Figura 25 - Estações do *Bike* Rio localizadas nas áreas de interesse 68
Figura 26 - Pontos de ônibus localizados nas áreas de interesse 69
Figura 27 - Disposição das estações do *Bike* Rio em 2017 70
Figura 28 - Pontos de ônibus no Rio de Janeiro em 2016 71

Figura 29 - Distribuição de Distâncias do P-*space* e P-*space* Aumentado 73
Figura 30 - Centralidade de Grau do P-*space* e P-*space* Aumentado 74
Figura 31 - Centralidade de Proximidade do P-*space* e P-*space* Aumentado 75
Figura 32 - Centralidade de Intermediação do P-*space* e P-*space* Aumentado..... 76
Figura 33 - Variação do grau médio do P-*space* Aumentado..... 77
Figura 34 - Variação do número de arestas do P-*space* Aumentado..... 80
Figura 35 - Distribuição de Distâncias do P-*space* Pedestres e P-*space* Aumentado Pedestres 82
Figura 36 - Centralidade de Grau do P-*space* Pedestres e P-*space* Aumentado Pedestres 83
Figura 37 - Centralidade de Proximidade do P-*space* Pedestres e P-*space* Aumentado Pedestres 84
Figura 38 - Centralidade de Intermediação do P-*space* Pedestres e P-*space* Aumentado Pedestres 85
Figura 39 - Variação do grau médio do P-*space* Aumentado Pedestres 86
Figura 40 - Variação do número de arestas do P-*space* Aumentado Pedestres..... 88
Figura 41 - Distribuição de Distâncias do P-*space* Limitado e P-*space* Aumentado Limitado 90
Figura 42 - Centralidade de Grau do P-*space* Limitado e P-*space* Aumentado Limitado 92
Figura 43 - Centralidade de Proximidade do P-*space* Limitado e P-*space* Aumentado Limitado 93
Figura 44 - Centralidade de Intermediação do P-*space* Limitado e P-*space* Aumentado Limitado 94
Figura 45 - Variação do grau médio do P-*space* Aumentado Limitado..... 95
Figura 46 - Variação do número de arestas do P-*space* Aumentado Limitado 97
Figura 47 - Distribuição de Distâncias do P-*space* Limitado Pedestres e P-*space* Aumentado Limitado Pedestres..... 100
Figura 48 - Centralidade de Grau do P-*space* Limitado Pedestres e P-*space* Aumentado Limitado Pedestres 101
Figura 49 - Centralidade de Proximidade do P-*space* Limitado Pedestres e P-*space* Aumentado Limitado Pedestres..... 102

Figura 50 - Centralidade de Intermediação do P-*space* Limitado Pedestres e P-*space* Aumentado Limitado Pedestres 103
Figura 51 - Variação do grau médio do P-*space* Aumentado Limitado Pedestres 104
Figura 52 - Variação do número de arestas do P-*space* Aumentado Limitado Pedestres 106
Figura 53 - Pontos de ônibus no P-*space* e P-*space* Aumentado com maiores valores de centralidade. (a) Intermediação. (b) Grau. (c) Proximidade 121
Figura 54 - Pontos de ônibus no P-*space* Pedestres e P-*space* Aumentado Pedestres com maiores valores de centralidade. (a) Intermediação. (b) Grau. (c) Proximidade 122
Figura 55 - Pontos de ônibus no P-*space* Limitado e P-*space* Aumentado Limitado com maiores valores de centralidade. (a) Intermediação. (b) Grau. (c) Proximidade 123
Figura 56 - Pontos de ônibus no P-*space* Limitado Pedestres e P-*space* Aumentado Limitado Pedestres com maiores valores de centralidade. (a) Intermediação. (b) Grau. (c) Proximidade 124

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Palavras-chave utilizadas para pesquisa nas bases de dados 30
Tabela 2 - Informações gerais sobre os artigos pesquisados a partir de 2010 32
Tabela 3 - Classificação dos meios de transporte 34
Tabela 4 - Tipos de operadores de programas de *bikesharing* 42
Tabela 5 - Propriedades do P-*space* e P-*space* Aumentado 72
Tabela 6 - Centralização do P-*space* e P-*space* Aumentado 74
Tabela 7 - Grau Médio do P-*space* Aumentado 78
Tabela 8 - Distância Média do P-*space* Aumentado 78
Tabela 9 - Densidade do P-*space* Aumentado 79
Tabela 10 - Número de Arestas do P-*space* Aumentado 80
Tabela 11 - Propriedades do P-*space* Pedestres e P-*space* Aumentado Pedestres 81
Tabela 12 - Centralização do P-*space* Pedestres e P-*space* Aumentado Pedestres 83
Tabela 13 - Grau Médio do P-*space* Aumentado Pedestres 86
Tabela 14 - Distância Média do P-*space* Aumentado Pedestres 87
Tabela 15 - Densidade do P-*space* Aumentado Pedestres 87
Tabela 16 - Número de Arestas do P-*space* Aumentado Pedestres 88
Tabela 17 - Propriedades do P-*space* Limitado e P-*space* Aumentado Limitado 90
Tabela 18 - Centralização do P-*space* Limitado e P-*space* Aumentado Limitado 91
Tabela 19 - Grau Médio do P-*space* Aumentado Limitado 95
Tabela 20 - Distância Média do P-*space* Aumentado Limitado 96
Tabela 21 - Densidade do P-*space* Aumentado Limitado 97
Tabela 22 - Número de Arestas do P-*space* Aumentado Limitado 98
Tabela 23 - Propriedades do P-*space* Limitado Pedestres e P-*space* Aumentado Limitado Pedestres 99
Tabela 24 - Centralização do P-*space* Limitado Pedestres e P-*space* Aumentado Limitado Pedestres 100
Tabela 25 - Grau Médio do P-*space* Aumentado Limitado Pedestres 104
Tabela 26 - Distância Média do P-*space* Aumentado Limitado Pedestres 105
Tabela 27 - Densidade do P-*space* Aumentado Limitado Pedestres 105

Tabela 28 - Número de Arestas do P-*space* Aumentado Limitado Pedestres 106
Tabela 29 - Propriedades das redes completas 107
Tabela 30 - Propriedades das redes limitadas 108
Tabela 31 - Variação das propriedades das redes completas em comparação com P-*space* 108
Tabela 32 - Variação das propriedades das redes limitadas em comparação com P-*space* Limitado 109

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ARS	Análise de Redes Sociais
BRS	*Bus Rapid Service*
BRT	*Bus Rapid Transit*
GPS	*Global Positioning System*
GTFS	*General Transit Feed Specification*
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
PDTU	Plano Diretor de Transporte Urbano da Região Metropolitana
PODD	Pesquisa Origem Destino Domiciliar
PMUS	Plano de Mobilidade Urbana Sustentável
RTO	Rede de Transporte por Ônibus
RTP	Rede de Transporte Público

SUMÁRIO

Introdução **15**

1. Análise de Redes Sociais **19**

1.1. Grau 21

1.2. Distância 21

1.3. Densidade 22

1.4. Centralidade 23

2. Rede de Transporte Público **25**

2.1. Modelos Topológicos 26

2.1.1. L-*space* 27

2.1.2. B-*space* 28

2.1.3. P-*space* 28

2.1.4. C-*space* 29

2.2. Pesquisas relacionadas 30

3. Mobilidade Urbana no Rio de Janeiro **33**

4. Bicicletas Compartilhadas **41**

4.1. Desafios 43

4.2. Benefícios 45

4.3. Programas de *bikesharing* no mundo 47

4.4. *Bikesharing* no Rio de Janeiro 50

5. Metodologia **55**

5.1. Algoritmo para geração das redes 57

5.2. Análise das propriedades das redes 60

6. Modelagem do Problema **62**

6.1. P-*space* Aumentado 63

6.2. P-*space* Pedestres 65

6.3. P-*space* Limitado 67

7. Análise dos Resultados 70

7.1. P-*space* Aumentado 71

7.2. P-*space* Aumentado Pedestres 81

7.3. P-*space* Aumentado Limitado 89

7.4. P-*space* Aumentado Limitado Pedestres 98

7.5. Síntese dos Resultados 107

Considerações Finais 112

Referências 116

Apêndice A – Mapa com os pontos de ônibus com os maiores valores de centralidade nas redes completas 121

Apêndice B – Mapa com os pontos de ônibus com os maiores valores de centralidade nas redes limitadas 123

Introdução

A mobilidade urbana costumava abordar predominantemente questões relacionadas à malha viária e fluxo de transporte de passageiros, ou seja, analisava as condições de deslocamento da população pela cidade, com ênfase na infraestrutura necessária e nos meios de transporte disponíveis (PERO; MIHESSEN, 2013).

No entanto, atualmente, o conceito de mobilidade urbana é mais abrangente, compreendendo também questões ambientais, econômicas e sociais. Com o intuito de melhorar a qualidade de vida da população, a partir do aprimoramento das condições urbanas no que tange a mobilidade e acessibilidade. Este novo conceito tem sido denominado mobilidade urbana sustentável (DA SILVA *et al*., 2008).

De acordo com Pero e Mihessen (2013), a importância da mobilidade urbana é evidente, principalmente nas grandes cidades, onde esta questão é ainda mais crítica devido ao tamanho da população e forma de ocupação do solo urbano. Por esse motivo, em diversas cidades do Brasil, como no caso do Rio de Janeiro, foram implementadas medidas no setor de transportes, como a expansão da malha cicloviária e melhorias na infraestrutura e qualidade do transporte público, visando incentivar a utilização da bicicleta e do transporte coletivo, a fim de facilitar o deslocamento da população pela cidade sem prejudicar o meio ambiente.

A análise de redes sociais tem grande utilidade para estudos na área da mobilidade urbana, visto que esta ferramenta é constantemente aplicada para representação e análise de redes de transporte público.

A análise de redes sociais estuda as conexões entre os atores (vértices) da rede. Possibilitando a obtenção de diversas informações relevantes sobre a mesma, a partir da identificação e interpretação dos padrões de ligações (relações) entre os atores e também por meio da análise das propriedades da rede (DE NOOY *et al*., 2005).

Uma rede, também chamada de grafo na literatura matemática, consiste em um conjunto de vértices (também conhecidos como nós) que são conectados entre si por meio de arestas ou arcos. Existem vários exemplos de redes no mundo real, como a internet, redes sociais, redes de coautoria de artigos, redes organizacionais, redes de transporte público, redes neurais, entre outras (NEWMAN, 2003).

As redes são usadas com frequência para representar os sistemas de transporte público, compostos por redes de trem, metrô e ônibus, no geral. Esses sistemas são formados por um conjunto de linhas e suas respectivas estações. Podendo ser representados por modelos topológicos de redes de transporte público, como P-*space*, por exemplo (LIN; BAN, 2013). Neste trabalho é analisado especificamente o sistema de transporte público de ônibus com a integração das bicicletas compartilhadas.

Esta pesquisa foca sua análise na rede de ônibus da cidade do Rio de Janeiro, pois os ônibus são considerados o meio de transporte público predominante na maioria das cidades do Brasil, devido ao seu baixo custo de implantação, oferta adaptável às variações da demanda e flexibilidade operacional (DE ARAÚJO *et al*., 2012).

Neste estudo é utilizado para análise da rede de ônibus da cidade do Rio de Janeiro o modelo topológico de rede de transporte público chamado de P-*space*, no qual os vértices são os pontos de ônibus e as arestas são as ligações entre os pontos que atendem linhas de ônibus em comum. De modo que todos os vértices vizinhos a um determinado vértice podem ser alcançados por ele sem a necessidade de mudança de linha, ou seja, sem realizar baldeação (VON FERBER *et al*., 2009).

Além disso, são inseridas nesta análise as bicicletas compartilhadas, visto que, segundo Lin e Yang (2011), os programas de compartilhamento de bicicletas estendem o alcance dos sistemas de transporte público, a partir de sua integração com os meios de transporte coletivo existentes. Esses programas disponibilizam para toda população acesso a bicicletas, com o intuito de diminuir o uso de automóveis para curtas distâncias, contribuindo assim, para redução de congestionamentos e poluição do ar.

No Rio de Janeiro o programa de compartilhamento de bicicletas é o *Bike* Rio, projeto da prefeitura da cidade para incentivar o uso de bicicleta como meio de transporte. Este sistema é composto por estações de bicicletas dispostas em locais estratégicos na cidade, onde os usuários cadastrados podem pegar uma bicicleta de uma estação e, após realizar sua viagem, devolvê-la na mesma ou em qualquer outra estação disponível.

A partir da integração das estações de bicicletas do *Bike* Rio com a rede de ônibus da cidade do Rio de Janeiro (P-*space*) foi gerada a rede desenvolvida neste projeto, chamada de P-*space* Aumentado, que além de conectar os pontos de parada que

possuem linhas de ônibus em comum, também ligam os pontos de ônibus que podem ser alcançados utilizando bicicletas compartilhadas.

Dessa forma, o objetivo deste estudo é analisar o impacto das bicicletas compartilhadas do *Bike* Rio na rede de ônibus da cidade do Rio de Janeiro, utilizando o modelo topológico P-*space* para representação desta rede e propriedades de redes sociais para sua análise.

Para realizar essa análise, foi desenvolvido um modelo que integra as estações do *Bike* Rio com os pontos de ônibus do município do Rio de Janeiro, de modo a possibilitar a comparação da rede de ônibus da cidade com a rede gerada por este modelo, que integra as bicicletas compartilhadas (utilizadas como alimentadoras deste sistema de transporte público) à rede de ônibus. Além da estrutura, também foram comparadas as propriedades das redes geradas. A premissa do modelo desenvolvido neste estudo é que sempre há bicicletas e vagas disponíveis nas estações.

Buscando analisar o impacto das bicicletas compartilhadas na rede de ônibus da cidade do Rio de Janeiro foram geradas as seguintes redes: P-*space* Aumentado, que é uma rede criada a partir do P-*space* que integra as estações de bicicletas do *Bike* Rio com a rede de ônibus da cidade, P-*space* Aumentado Pedestres, que considera o deslocamento realizado pelos pedestres entre pontos de ônibus, P-*space* Aumentado Limitado, que delimita a área de estudo, e P-*space* Aumentado Limitado Pedestres, que consiste em uma combinação das duas redes citadas anteriormente. Todas as redes citadas neste parágrafo integram as bicicletas compartilhadas com os ônibus da cidade.

Este trabalho relaciona a teoria estudada com a modelagem desenvolvida, visando responder certas questões como: quantas linhas de ônibus, em média, são necessárias para se deslocar de um ponto de ônibus a outro ponto qualquer da cidade? Houve mudanças expressivas na rede de ônibus da cidade com a integração das bicicletas compartilhadas? A cidade se torna mais conectada com a utilização das bicicletas compartilhadas como alimentadoras dos ônibus? Há alterações significativas nas propriedades da rede de ônibus da cidade ao considerar os deslocamentos realizados a pé entre pontos de ônibus? A limitação da área de estudo na cidade do Rio de Janeiro influencia nos resultados obtidos?

Devido à situação crítica da mobilidade urbana do Rio de Janeiro, a principal motivação para realização deste estudo está na possibilidade de contribuir para o

alcance de uma mobilidade urbana mais sustentável, a partir da integração das bicicletas compartilhadas com o transporte público da cidade. Os programas de compartilhamento de bicicletas são mais uma opção de transporte sustentável nas cidades e proporcionam uma maneira rápida, limpa e barata de se deslocar pelos centros urbanos, complementando o serviço de transporte público. Além disso, este trabalho promove o incentivo ao uso de bicicleta, que proporciona melhoria na qualidade de vida da população e também contribui para redução da emissão de gases poluentes e congestionamentos.

Este estudo está estruturado em sete capítulos. Nos quatro primeiros é realizada uma revisão bibliográfica que aborda os conceitos relacionados à análise de redes sociais, modelos topológicos de redes de transporte público, análise da mobilidade urbana na cidade do Rio de Janeiro e descrição do modelo atual e da evolução histórica dos programas de compartilhamento de bicicletas. No quinto capítulo é explicada a metodologia utilizada para fazer a pesquisa em questão. Seguido pelo sexto capítulo, no qual é explicado o modelo desenvolvido para geração das redes analisadas neste estudo. No capítulo sete são analisados os resultados desta pesquisa, a partir da comparação das propriedades das redes geradas. E por fim, são apresentadas as considerações finais deste estudo.

1. Análise de Redes Sociais

A ciência que analisa a conexão e interação entre elementos em um sistema é conhecida como teoria das redes complexas. Esta área de estudo tem evoluído muito, principalmente a partir da proposta dos modelos do mundo pequeno e da rede livre de escala que promoveram o aumento do número de pesquisas sobre este assunto em diferentes áreas de estudo. Como é o caso dos sistemas de transporte que têm sido uma das áreas de pesquisa abordadas nos estudos de redes complexas, visto que possuem a estrutura de uma rede (LIN; BAN, 2013).

As redes complexas se relacionam com diversas áreas de estudo, como por exemplo, a matemática, ao abordar a teoria dos grafos, e a análise de redes sociais, ao buscar compreender o comportamento de grandes redes interativas (SVENSON, 2006).

Segundo Wasserman e Faust (1994), a Análise de Redes Sociais (ARS) busca compreender as ligações (arestas ou arcos) entre atores sociais (vértices) e as implicações desses vínculos. Esses atores podem ser indivíduos, empresas, entre outros. Dessa forma, a partir da ARS é possível definir de forma precisa importantes conceitos sociais e testar teorias sobre relações sociais.

A estrutura de uma rede é representada por um grafo, que consiste em um conjunto de vértices (que simbolizam atores sociais) e ligações (arestas ou arcos), onde cada ligação conecta um par de vértices. Em um grafo orientado (também chamado de direcionado) as ligações entre os vértices são chamadas de arcos, já em um grafo não-orientado (não-direcionado) todas as conexões entre os vértices são denominadas arestas. Conforme é ilustrado na Figura 1. Sendo assim, uma rede pode ser definida como um grafo que possui informações adicionais presentes em seus vértices ou em suas arestas/arcos (DE NOOY *et al*., 2005).



Figura 1 - Exemplo de grafo orientado e não-orientado
Fonte: Adaptado de Newman (2003)

Em um grafo orientado as ligações que conectam pares de vértices, conhecidas como arcos, têm apenas uma única direção e são representadas por setas para indicar sua orientação. Enquanto nos grafos não-orientados elas seguem ambas as direções e são chamadas de arestas (NEWMAN, 2003). As redes analisadas neste estudo não são orientadas, ou seja, seus vértices são conectados por arestas, visto que o sentido das ligações entre os vértices não é relevante neste caso.

Uma característica importante presente na análise de redes sociais é o efeito do mundo pequeno. Este conceito foi introduzido por Stanley Milgram, que conduziu um experimento na década de 1960 com o objetivo de analisar o trajeto seguido pelas cartas endereçadas a uma determinada pessoa em Pittsburgh, enviadas por moradores da zona rural do Nebraska a seus conhecidos mais próximos visando que chegassem ao indivíduo alvo em Pittsburgh. Somente um terço das cartas chegou ao destino final, com média de seis ligações existentes na rede de pessoas entre Nebraska e Pittsburgh, o que originou o termo "seis graus de separação". Isso significa que, em média, todas as pessoas são conectadas por um pequeno número de intermediários (SVENSON, 2006).

Sendo assim, o fenômeno do mundo pequeno sugere que nas grandes redes a distância média entre um par de vértices qualquer da rede é muito menor do que o número total de vértices existentes na rede (LU; SHI, 2007).

A rede regular é o tipo de rede mais simples que existe. Estas redes são fortemente conectadas, visto que a remoção de um vértice não torna a rede desconexa. O exemplo mais simples de rede regular é o grafo completo, no qual todos os vértices se conectam entre si (SVENSON, 2006).

Outro tipo de rede importante é a rede livre de escala que é identificada a partir de sua distribuição de graus, que segue a lei de potência. Isso significa que poucos vértices possuem grau elevado, ou seja, são altamente conectados, enquanto a maioria dos vértices tem grau baixo, possuindo assim poucas conexões (LIN; BAN, 2013).

Já no modelo de redes aleatórias, proposto por Erdős and Rényi, os vértices são conectados entre si aleatoriamente e possuem aproximadamente o mesmo número de ligações. Cada par de vértices da rede tem a mesma probabilidade de ser conectado e a distribuição de graus dessas redes segue a distribuição de Poisson (DIMITROV; CEDER, 2016).

Para analisar as redes geradas neste estudo foram obtidas algumas de suas propriedades, como o grau médio, distância média entre vértices, diâmetro, densidade e medidas de centralidade (grau, proximidade e intermediação).

1.1. Grau

Em uma rede, o grau de um vértice é o número de arestas incidentes no vértice, ou seja, representa o número de arestas presentes em cada vértice da rede. Vértices com grau elevado geram redes mais densas, devido ao fato de possuírem mais ligações entre si. Por esse motivo, o grau médio da rede pode ser utilizado para medir a coesão estrutural da mesma, sendo mais apropriado para este fim do que a densidade, visto que não depende do tamanho da rede (DE NOOY *et al*., 2005).

Conforme explicado por Newman (2003), em um grafo orientado existem dois tipos de grau para cada vértice, que são chamados de grau de entrada e grau de saída do vértice e consistem no número de arcos que entram e saem do vértice, respectivamente.

A distribuição de graus dos vértices de uma rede é obtida a partir da função densidade de probabilidade $p\ (x = k)$ que calcula a probabilidade de um vértice ter grau igual a k, ou seja, é a proporção de vértices que possuem grau igual a k em relação a todos os vértices da rede. A distribuição de graus também pode ser gerada pela função de distribuição de probabilidade acumulada $p\ (x \geq k)$ que calcula a probabilidade de um vértice ter grau igual ou maior que k, ou seja, é a fração de vértices que possuem grau igual ou maior que k (LU; SHI, 2007).

1.2. Distância

A distância geodésica (ou simplesmente distância, como será chamada neste estudo) é o comprimento do menor caminho entre dois vértices, ou seja, é o número de arestas do caminho mínimo. Sendo assim, a distância entre dois vértices em uma rede equivale ao comprimento do caminho mais curto entre eles, caso não exista nenhum caminho entre um par de vértices a distância entre eles será infinita ou indefinida. Logo, a distância média de uma rede é a média das distâncias entre todos os pares de vértices da rede. A distância é uma medida muito relevante para análise de redes sociais, sendo

usada para construção de subgrupos coesos e para obtenção de algumas medidas de centralidade (WASSERMAN; FAUST, 1994).

Newman (2003) ressalta que pode existir mais de um caminho mínimo (caminho geodésico), aquele com menor comprimento, entre um par de vértices em uma rede e ainda afirma que geralmente isso ocorre.

Segundo Wasserman e Faust (1994) o comprimento (número de arestas) da maior distância geodésica entre qualquer par de vértices em uma rede é chamado de diâmetro. Ou seja, o diâmetro é o maior caminho mínimo existente entre qualquer par de vértices em uma rede.

1.3. Densidade

De acordo com De Nooy *et al*. (2005), a densidade de uma rede é a razão entre o número de arestas presentes na rede e o número máximo de arestas possíveis. Sendo assim, quanto maior for a rede, menor será sua densidade, visto que a quantidade de arestas possíveis aumenta rapidamente com o número de vértices, enquanto o número de arestas que cada vértice pode ter é limitado.

Wasserman e Faust (1994) corroboram esta definição de densidade, ao afirmar que a densidade (Δ) consiste na proporção de arestas possíveis que realmente se encontram presentes no grafo, ou seja, é a fração do número de arestas existentes no grafo (m) pelo número máximo de arestas possíveis (L). O valor de L é determinado pelo número de vértices (n) da rede, sendo $L = n(n-1)/2$. O cálculo para obtenção do valor da densidade da rede é apresentado na Equação 1:

$$\Delta = \frac{m}{n(n-1)/2} = \frac{2m}{n(n-1)} \qquad \textbf{(1)}$$

A densidade de um grafo pode variar de 0 a 1. Quando o grafo não possui ligações entre os vértices a densidade é igual a zero. Já quando a densidade é igual a 1, significa que o grafo é completo, ou seja, possui todas as arestas possíveis e, portanto, todos os vértices são adjacentes (WASSERMAN; FAUST, 1994).

Outra característica importante das redes refere-se a sua conectividade, que avalia como os vértices se conectam entre si (NEWMAN, 2003). Indica os vértices e arestas/arcos que são críticos para a conectividade da rede, ou seja, aqueles que se forem

removidos da rede podem torná-la desconexa. Por esse motivo é utilizada para medir a coesão do grafo. Um grafo coeso possui muitas arestas e vértices com altos graus, além de apresentar distâncias pequenas entre os vértices e baixo diâmetro em relação ao tamanho da rede. Quando um grafo não é coeso, ele é mais suscetível a se tornar desconexo com a remoção de vértices ou arestas (WASSERMAN; FAUST, 1994).

Segundo De Nooy *et al*. (2005), um grafo é conexo se todos os pares de vértices são ligados por um caminho, ou seja, quando é possível alcançar todos os vértices partindo de qualquer vértice da rede. Caso contrário, o grafo é denominado desconexo.

Os grafos desconexos contêm dois ou mais subgrafos, que não se conectam entre si. Cada subgrafo conexo é uma componente de um grafo, ou seja, uma componente é um subgrafo no qual existe pelo menos um caminho entre todos os pares de vértices. Sendo assim, em um grafo conexo existe apenas uma componente (WASSERMAN; FAUST, 1994).

Nas redes com poucas ligações entre os vértices, ou seja, com densidade muito baixa, os vértices pertencem somente a pequenas componentes. Porém, conforme o número total de ligações entre os vértices aumenta, se aproxima a formação de uma componente gigante na rede. A componente gigante é um grande grupo de vértices, no qual todos se conectam entre si por pelo menos um caminho (NEWMAN, 2001).

1.4. Centralidade

As medidas de centralidade foram desenvolvidas visando medir o nível de relevância de um dado vértice em um grafo (VON FERBER *et al.*, 2009). Neste estudo foram obtidos os valores da centralidade de intermediação (*betweenness centrality*), centralidade de grau (*degree centrality*) e centralidade de proximidade (*closeness centrality*) dos vértices das redes geradas.

Segundo Wasserman e Faust (1994), na centralidade de intermediação um vértice é considerado central quando frequentemente está presente na geodésica entre outros pares de vértices da rede. Dessa forma, este vértice torna-se intermediário na interação entre pares de vértices não adjacentes, possuindo certo controle sobre essa interação. A centralidade de intermediação do vértice v_i é calculada pela Equação 2, na

qual g_{jk} é o número de geodésicas entre os vértices v_j e v_k e $g_{jk}(v_i)$ é o número de geodésicas entre v_j e v_k contendo v_i.

$$C_B(v_i) = \sum_{\substack{j<k \\ j,k \neq i}}^{n} \frac{g_{jk}(v_i)}{g_{jk}} \quad (2)$$

Lin e Ban (2013) afirmam que o vértice mais importante, segundo a centralidade de grau, é aquele que possui maior grau, ou seja, maior número de arestas o conectando com os demais vértices da rede. Sendo assim, o vértice com maior centralidade de grau é o que possui mais conexões diretas com os outros vértices da rede. O cálculo da centralidade de grau do vértice v_i é dado pela Equação 3, na qual a_{ij} é o valor indicado pela matriz de adjacência (a_{ij} é igual a 1 quando existe uma ligação direta entre os vértices v_i e v_j e a_{ij} é igual a 0, caso contrário) e n é o número de vértices da rede.

$$C_D(v_i) = \sum_{j=1}^{n} a_{ij} \quad (3)$$

De acordo com Wasserman e Faust (1994), na centralidade de proximidade o vértice mais central é o que está mais próximo de todos os vértices da rede, ou seja, é o vértice que apresenta menor distância em relação aos demais, podendo assim, se comunicar mais rapidamente com os outros vértices. A centralidade de proximidade do vértice v_i é calculada pela Equação 4, na qual $d(v_i,v_j)$ é a menor distância entre os vértices v_i e v_j. Pode-se verificar na Equação 4 que a centralidade de proximidade de v_i é o inverso da soma das distâncias de v_i para todos os outros vértices da rede.

$$C_C(v_i) = \frac{1}{\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{n} d(v_i, v_j)} \quad (4)$$

A rede é considerada mais centralizada quanto maior for a variação do valor da centralidade de seus vértices. A centralização de uma rede é a variação da centralidade (de proximidade, intermediação ou grau) dos vértices da rede dividida pela máxima variação possível dos valores de centralidade dos vértices em uma rede de mesmo tamanho. A centralização é maior se houver na rede vértices muito centrais e também muito periféricos (DE NOOY *et al.*, 2005).

2. Rede de Transporte Público

Segundo Lu e Shi (2007), uma rede é composta por um conjunto de vértices e arestas, podendo representar alguns sistemas reais, tais como redes de transporte, redes neurais, *World Wide Web* e redes de energia elétrica, por exemplo. Nas redes, os vértices são os atores e a relação existente entre esses atores é representada pelas arestas.

As redes de transporte são consideradas redes espaciais, que representam a estrutura do transporte de indivíduos, bens materiais ou informação de um ponto para outro. As redes espaciais são redes nas quais os vértices estão distribuídos em um espaço, na maioria das vezes bidimensional, medido pela distância Euclidiana (BARTHÉLEMY, 2011).

Com o aumento do número de estudos sobre redes complexas, muitas redes do mundo real têm sido analisadas por possuírem características de redes complexas. Nos últimos anos, tem se destacado os trabalhos sobre Redes de Transporte Público (RTP) que estão sendo analisadas a partir da utilização de diversos conceitos de redes complexas (SIENKIEWICZ; HOŁYST, 2005).

Lu e Shi (2007) verificaram em seu estudo sobre a complexidade das redes de transporte, que as redes de transporte público apresentam algumas características de redes complexas. Sendo esta uma das razões para o crescimento do número de estudos sobre RTPs.

No sistema de transporte público de toda cidade é evidente o grande impacto das redes de transporte público urbano na economia e na mobilidade urbana, principalmente no caso das metrópoles, onde são transportados milhões de passageiros diariamente (CHEN *et al*., 2007). A grande relevância das RTPs também motivou o aumento da quantidade de estudos sobre este tema.

De acordo com Xu *et al.* (2007), nas RTPs os vértices representam as estações e as arestas conectam as estações atendidas ao longo da rota do transporte público analisado. Existem vários tipos de redes de transporte público, como a rede ferroviária, rede de metrô e rede de ônibus.

Neste estudo será analisada a Rede de Transporte por Ônibus (RTO) da cidade do Rio de Janeiro, visto que os ônibus são considerados o meio de transporte público predominante no Brasil (DE ARAÚJO *et al*., 2012).

Os dois elementos básicos de uma RTO são as rotas e os pontos de parada dos ônibus, também chamadas de linhas de ônibus e pontos de ônibus, respectivamente. Uma rota é formada a partir de um conjunto de pontos de ônibus. Geralmente, a rede de transporte por ônibus é uma rede não-orientada, ou seja, os vértices são conectados por arestas. Isso ocorre, pois, normalmente, usando uma determinada linha de ônibus pode-se viajar da estação A para estação B, da mesma forma que também é possível viajar da estação B para a estação A utilizando a mesma linha de ônibus (LU; SHI, 2007).

As redes de transporte por ônibus são compostas por vértices e arestas, que representam, respectivamente, os pontos de parada e as linhas de ônibus que conectam os pontos atendidos ao longo de sua rota (XU *et al*., 2007).

Para compreender redes grandes, como a do sistema de transporte público de ônibus, são utilizados métodos estatísticos para obtenção de suas propriedades. Essas propriedades quantificam essas redes, além de caracterizarem a sua estrutura e comportamento (NEWMAN, 2003).

Segundo Sienkiewicz e Hołyst (2005), para analisar as propriedades das RTPs deve-se, primeiramente, definir um modelo topológico adequado para representá-las. Assim, foram criados os *spaces*.

2.1. Modelos Topológicos

De acordo com Von Ferber *et al.* (2009), as redes de transporte público podem ser representadas por quatro modelos topológicos, conhecidos como B-*space*, P-*space*, C-*space* e L-*space*.

A Figura 2 mostra uma rede simples de transporte público (2a) e seus diferentes modelos topológicos: L-*space* (2b), B-*space* (2c), P-*space* (2d) e C-*space* (2e). Os pontos de parada são indicados pelas letras de A à F e as linhas de ônibus são representadas pelos números de 1 a 3 e pelas cores das arestas que conectam os pontos de parada, indicando assim, a trajetória de cada linha. As arestas em vermelho, verde e azul representam, respectivamente, as linhas 1, 2 e 3.

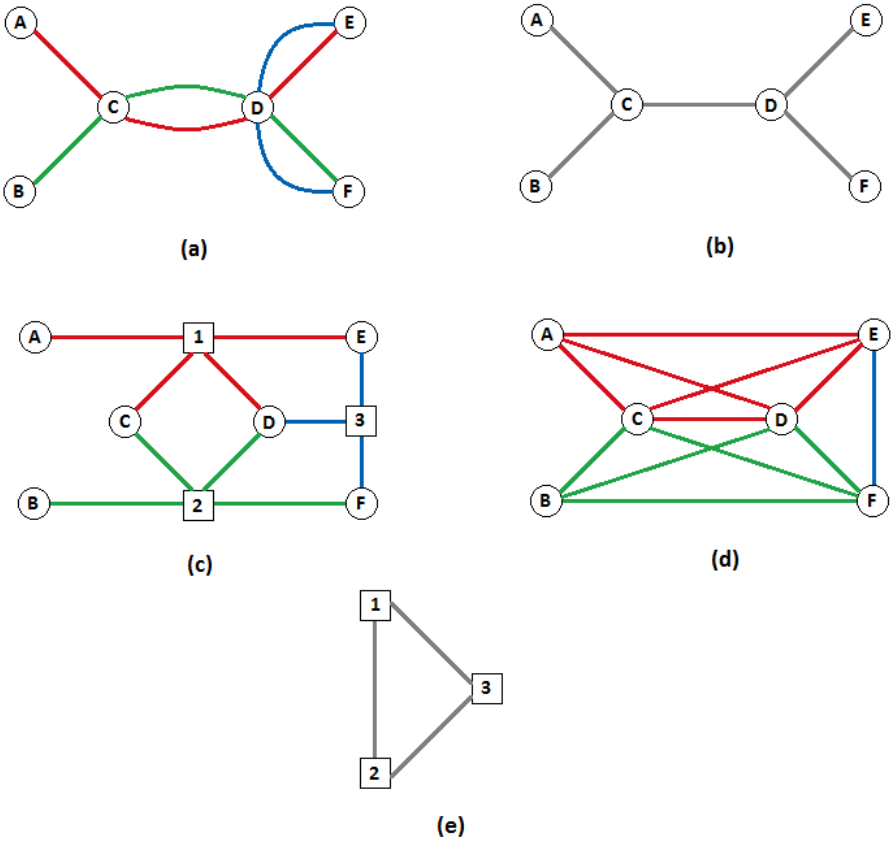


Figura 2 - Modelos topológicos de redes de transporte público. (a) Rede simples de transporte público. (b) L-*space*. (c) B-*space*. (d) P-*space*. (e) C-*space*
Fonte: Adaptado de Von Ferber *et al.* (2009)

É apresentada na Figura 2a uma rede simples de transporte por ônibus, na qual existem 6 pontos de parada indicados pelos círculos de A à F e 3 linhas de ônibus, sendo suas rotas representadas pela cor das arestas que ligam os pontos (vermelho, verde e azul). A rota da linha 1 (vermelho) compreende os pontos A, C, D e E. Já a rota da linha 2 (verde) passa pelos pontos B, C, D e F. Por fim, a rota da linha 3 (azul) atende os pontos E, D e F.

2.1.1. L-*space*

Assim como no P-*space*, os vértices no L-*space* são pontos de parada. A diferença entre esses modelos é que no L-*space* os vértices são conectados quando são pontos de parada sucessivos de uma determinada linha de ônibus. O grau do vértice no L-*space* mostra o número de pontos de parada diferentes que se pode alcançar

diretamente a partir de um determinado ponto. E a distância apresenta o número de pontos de parada entre dois pontos quaisquer (BARTHÉLEMY, 2011).

Na Figura 2b é representado o L-*space*, no qual os vértices são pontos de ônibus que se ligam quando compõem pontos consecutivos de uma determinada linha de ônibus. Os vértices A-C-D-E se conectam por serem pontos de parada sucessivos da linha de ônibus 1 (arestas em vermelho na Figura 2a). Assim como os vértices B-C-D-F que são pontos de ônibus consecutivos da linha 2 (arestas em verde na Figura 2a). O mesmo ocorre com os vértices E-D-F que são pontos de parada da linha 3 (arestas em azul na Figura 2a) que se sucedem.

2.1.2. B-*space*

O B-*space* é um grafo bipartido, no qual tanto os pontos de parada (estações) quanto as linhas de ônibus são representados por vértices, sendo que não há ligações entre vértices do mesmo conjunto, ou seja, os vértices das linhas de ônibus não se conectam entre si, assim como os vértices de pontos de parada. Cada vértice de linha de ônibus é ligado aos vértices dos pontos de parada atendidos pela linha em questão, o mesmo ocorre para os pontos de parada que são conectados às linhas que os atendem. A partir do B-*space* são projetados o P-*space* e C-*space* (VON FERBER *et al.*, 2009).

Conforme pode ser observado na Figura 2c, na qual é apresentado o B-*space* que consiste em uma rede bipartida composta por dois subconjuntos, sendo eles os pontos de parada representados pelos vértices A-B-C-D-E-F e as linhas de ônibus indicadas pelos vértices 1-2-3. O vértice que representa a linha 1 se conecta aos vértices A, C, D e E, visto que a linha de ônibus 1 faz parada nesses pontos. O mesmo ocorre com o vértice da linha 2 que se liga aos vértices B, C, D e F. Assim como o vértice da linha 3 que se conecta com os vértices E, D e F por atender esses pontos.

2.1.3. P-*space*

No P-*space* os vértices são pontos de parada e eles são conectados se forem atendidos por pelo menos uma linha de ônibus em comum. Assim sendo, o grau do vértice no P-*space* indica a quantidade de pontos de parada que podem ser alcançados

usando apenas uma linha de ônibus. Já a distância mostra o número de linhas de ônibus necessárias para se deslocar de um ponto de parada para outro, portanto, se a distância for igual a dois significa que são necessárias duas linhas para chegar ao destino, ou seja, deverá ser realizada uma baldeação (SIENKIEWICZ; HOŁYST, 2005).

Na Figura 2d é apresentado o P-*space* que é composto pelos vértices A, B, C, D, E e F que são os pontos de parada da rede de transporte em questão. Sendo conectados os vértices A, C, D e E que representam pontos de parada que são atendidos pela linha de ônibus 1. Também são ligados os vértices B, C, D e F que são pontos de parada em comum da linha 2. Assim como ocorre com os vértices E, D e F que são conectados entre si por serem pontos de parada da linha 3.

Neste trabalho é utilizado o modelo topológico P-*space* para analisar o impacto da integração das bicicletas compartilhadas na rede de ônibus da cidade do Rio de Janeiro, a partir da comparação da rede P-*space* com o modelo desenvolvido neste estudo chamado de P-*space* Aumentado. Este modelo de rede se baseia no P-*space* original, porém também conecta os pontos de ônibus que podem ser alcançados utilizando as bicicletas compartilhadas que, neste caso, servem como alimentadoras do sistema de transporte público de ônibus. A partir deste modelo foram criadas outras redes neste estudo para analisar mais detalhadamente esta questão.

2.1.4. C-*space*

No caso do C-*space* os vértices são as linhas de ônibus que são ligadas entre si caso compartilhem pelo menos um ponto de parada em comum. A distância média no C-*space* mostra o número médio de trocas de linhas de ônibus necessárias para se deslocar de uma linha para outra qualquer da rede. Enquanto o grau indica a quantidade de linhas para as quais é possível se transferir a partir da linha de ônibus analisada (VON FERBER *et al.*, 2009).

Na Figura 2e é representado o C-*space*, no qual os vértices são as linhas de ônibus 1, 2 e 3, que são conectados por atenderem pontos de parada em comum. Neste caso, as linhas 1 e 2 compartilham os pontos de parada C e D, enquanto as linhas 1 e 3 possuem em comum os pontos de parada D e E e as linhas 2 e 3 atendem em comum os pontos de parada D e F.

2.2. Pesquisas relacionadas

Muitos pesquisadores têm publicado artigos sobre redes de transporte público, utilizando conceitos de redes sociais para analisar as características topológicas dessas redes. Von Ferber *et al.* (2009), por exemplo, realizaram uma análise empírica das RTPs de 14 grandes cidades ao redor do mundo, utilizando os modelos topológicos L-*space*, B-*space*, P-*space* e C-*space* para representação dessas redes. Neste artigo foram identificadas e analisadas diversas propriedades dessas RTPs, como grau dos vértices, distância média entre vértices e centralidade de intermediação. Os meios de transporte considerados para elaboração das RTPs analisadas foram ônibus, ônibus elétrico, barca, metrô, bonde e trem, porém essas redes variam para cada cidade.

Com o intuito de fazer um levantamento dos trabalhos relacionados com o tema abordado neste estudo, foram pesquisados nas bases de dados *Scopus* e *Science Direct* artigos que analisassem RTPs utilizando o modelo topológico P-*space*. A seguir são descritos de forma resumida alguns desses trabalhos, publicados a partir de 2010 nas bases de dados citadas. As palavras-chave utilizadas nessas pesquisas são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Palavras-chave utilizadas para pesquisa nas bases de dados

Palavras-chave	Base de Dados	Campos
"space p" and "transport network" and "transportation"	*Scopus*	*Title / Abstract / Keywords*
"space p" and "transport network"	*Science Direct*	*Title / Abstract / Keywords*

Fonte: Elaboração Própria

Li e Zhu (2010) analisaram características estatísticas das redes de transporte por ônibus de três cidades da China (Pequim, Xangai e Hangzhou), modeladas utilizando o P-*space*. Além disso, desenvolveram um algoritmo, aplicado na rede de transporte por ônibus da cidade de Hangzhou, que identifica as rotas de transferência com menor número de transferências e distância de viagem.

No artigo de Yang *et al.* (2012) é simulada e estudada a propagação de epidemia em redes de transporte por ônibus de três grandes cidades chinesas (Pequim, Xangai e Hangzhou), descritas a partir do P-*space*.

O P-*space* também é utilizado no artigo de Xu *et al.* (2013), no qual são analisadas empiricamente as redes de transporte público de 330 cidades chinesas, baseadas neste modelo topológico. Esta análise das propriedades topológicas dessas redes permitiu verificar que as mesmas apresentam comportamento de redes de mundo pequeno e sua distribuição de grau segue a função exponencial.

De Bona *et al.* (2016) analisaram a estrutura da rede de transporte público de ônibus da cidade de Curitiba, no Brasil, utilizando o modelo topológico P-*space* para sua representação, e compararam as propriedades desta rede de Curitiba com as redes de transporte por ônibus de três cidades chinesas (Xangai, Pequim e Cantão) e três cidades polonesas (GOP, Varsóvia e Łódź). Após a modelagem da RTO de Curitiba como uma rede complexa, utilizando o modelo P-*space*, foram calculadas sua distribuição de graus, distância média, centralidade de proximidade e intermediação, entre outras propriedades a fim de descrever a rede analisada segundo as características das redes de mundo pequeno e livre de escala.

No artigo de Feng *et al.* (2016) foi realizado um estudo empírico da rede de transporte por ônibus de Harbin, na China. Devido à existência de muitas pistas de mão única em Harbin, as rotas de ida e volta de uma mesma linha de ônibus podem ser diferentes. Para explicar esta diferença entre as direções das rotas das linhas de ônibus em uma RTO foi introduzido o conceito de fator de duplicação. A partir da análise deste fator foi determinado que a RTO de Harbin era uma rede direcionada, logo, a mesma não podia ser descrita por modelos topológicos não-direcionados, como o P-*space*. Sendo assim, para descrever as características espaciais da rede direcionada analisada foi desenvolvido um novo modelo para representação de RTOs, baseado no P-*space*, denominado "P-*space* direcionado".

Wang e Ruan (2016) aplicaram a teoria de redes complexas na rede de Trânsito Urbano Ferroviário de Pequim, Xangai e Cantão, na China. Essas redes de transporte ferroviário foram modeladas pelos modelos topológicos P-*space* e L-*space*. A distribuição de graus e a eficiência da rede são analisadas a partir do L-*space* e os parâmetros de transferência da rede são estudados pelo P-*space*.

Na Tabela 2 são apresentadas as principais informações sobre os artigos analisados, encontrados nas pesquisas realizadas nas bases de dados *Scopus* e *Science Direct*. Nesta tabela são indicados os autores e ano de publicação dos artigos, o tipo de rede de transporte analisada e sua cidade/país de origem e o modelo topológico utilizado para representação da rede.

Tabela 2 - Informações gerais sobre os artigos pesquisados a partir de 2010

Autores	Modelo Topológico	Rede	Cidade (País)	Ano
Li e Zhu (2010)	P-*space*	Ônibus	Pequim, Xangai e Hangzhou (China)	2010
Yang *et al.* (2012)	P-*space*	Ônibus	Pequim, Xangai e Hangzhou (China)	2012
Xu *et al.* (2013)	P-*space*	Ônibus	330 cidades (China)	2013
De Bona *et al.* (2016)	P-*space*	Ônibus	Curitiba (Brasil); Xangai, Pequim e Cantão (China); e GOP, Varsóvia e Łódź (Polônia)	2016
Feng *et al.* (2016)	P-*space*	Ônibus	Harbin (China)	2016
Wang e Ruan (2016)	P-*space* e L-*space*	Ferroviária	Pequim, Xangai e Cantão (China)	2016

Fonte: Elaboração Própria

Nas duas bases de dados pesquisadas não foram encontrados artigos que relacionassem *bikesharing* com redes de transporte público de ônibus, aplicando o modelo topológico P-*space*, conforme é realizado neste estudo.

3. Mobilidade Urbana no Rio de Janeiro

Na Lei nº 12.587/2012, que institui as diretrizes da Política Nacional de Mobilidade Urbana, a mobilidade urbana é definida como a condição em que são realizados os deslocamentos da população e de cargas nas cidades (BRASIL, 2012).

O conceito atual de mobilidade urbana é mais abrangente, incorporando os princípios do desenvolvimento sustentável, que busca satisfazer as necessidades atuais sem comprometer a capacidade das gerações futuras de suprir suas próprias necessidades. Equilibrando os aspectos ambientais, econômicos e sociais, de modo a assegurar a eficácia econômica sem prejudicar o meio ambiente e abandonar as questões sociais. Garantindo o direito de acessibilidade e mobilidade a todos os cidadãos, e incentivando assim, a inclusão social (MAGAGNIN; DA SILVA, 2008).

O município do Rio de Janeiro possui área territorial de aproximadamente 1200 km^2 e população estimada de cerca de 6,5 milhões de habitantes no ano de 2017, sendo assim, a segunda maior cidade do Brasil em número de habitantes (IBGE, 2017).

Por ser uma cidade muito populosa, ocorre no Rio de Janeiro um grande fluxo diário de pessoas, principalmente no percurso casa-trabalho. Por este motivo, a mobilidade urbana torna-se ainda mais importante para o desenvolvimento desta cidade, tendo em vista que o aprimoramento do transporte público contribui para melhorias na qualidade de vida da população e desenvolvimento econômico da cidade (PERO; MIHESSEN, 2013).

Segundo Boareto (2008), o crescimento urbano desordenado gerou grandes concentrações populacionais em algumas cidades, como no o caso do Rio de Janeiro. Isso acarretou no colapso da infraestrutura urbana, que somado ao uso excessivo de automóveis provocou uma crise na mobilidade urbana dessas cidades. Resultando no aumento dos congestionamentos e da poluição atmosférica, piorando assim, a qualidade de vida da população.

Por esse motivo, foi elaborado pela Prefeitura do Rio de Janeiro, por meio da Secretaria Municipal de Transportes, o Plano de Mobilidade Urbana Sustentável (PMUS). Este plano busca guiar durante dez anos, a partir de 2016, os investimentos públicos em infraestruturas de transportes da cidade do Rio de Janeiro. Com o objetivo

principal de priorizar o transporte público e o não motorizado (como bicicletas, por exemplo), incentivando assim, a utilização de meios de transporte sustentáveis (PREFEITURA DA CIDADE DO RIO DE JANEIRO, 2018b).

O PMUS foi elaborado utilizando os dados do Plano Diretor de Transporte Urbano da Região Metropolitana (PDTU) de 2013, com foco na cidade do Rio de Janeiro. Esses dados permitem identificar as áreas onde são necessárias a construção de rotas cicloviárias e expansão da infraestrutura de transporte de alta capacidade, tendo em vista melhorar o deslocamento da população pela cidade (PREFEITURA DA CIDADE DO RIO DE JANEIRO, 2018b).

Assim como o PDTU, o PMUS foi desenvolvido a partir da análise dos resultados da Pesquisa Origem Destino Domiciliar (PODD) realizada em 2011 na Região Metropolitana do Rio de Janeiro. O PMUS foi elaborado com foco nos deslocamentos realizados apenas no município do Rio de Janeiro, enquanto o PDTU analisou os deslocamentos ocorridos em toda região metropolitana do Rio de Janeiro. Na PODD foram classificadas as viagens realizadas de acordo com o meio de transporte utilizado, agrupados conforme apresentado na Tabela 3 (PMUS, 2015).

Tabela 3 - Classificação dos meios de transporte

Meio de transporte	Grupo
A pé	A pé
Bicicleta/Ciclomotor	Bicicleta
Metrô	Metrô
Trem	Trem
Barco/Aerobarco/Catamarã	Barca
Ônibus municipal	Ônibus
Ônibus Intermunicipal	
Ônibus pirata [sic]	
Ônibus executivo	
Transp. Escolar	
Transp. Fretado	
Van	Van
Condutor de auto	Carro
Passageiro de auto	
Táxi	
Motocicleta	Moto
Moto-táxi	
Outros	Outros

Fonte: Adaptado de PMUS (2015)

Na Figura 3 é indicada a quantidade de viagens realizadas diariamente na cidade do Rio de Janeiro para cada meio de transporte utilizado, segundo a classificação apresentada na Tabela 3. Pode ser observado na Figura 3 que a maioria das viagens no município do Rio de Janeiro é realizada de ônibus, a pé e de carro, respectivamente. Esses três meios de transporte destacam-se perante aos outros, pois são responsáveis por mais de 80% das viagens realizadas na cidade do Rio de Janeiro, conforme pode ser verificado na Figura 4.

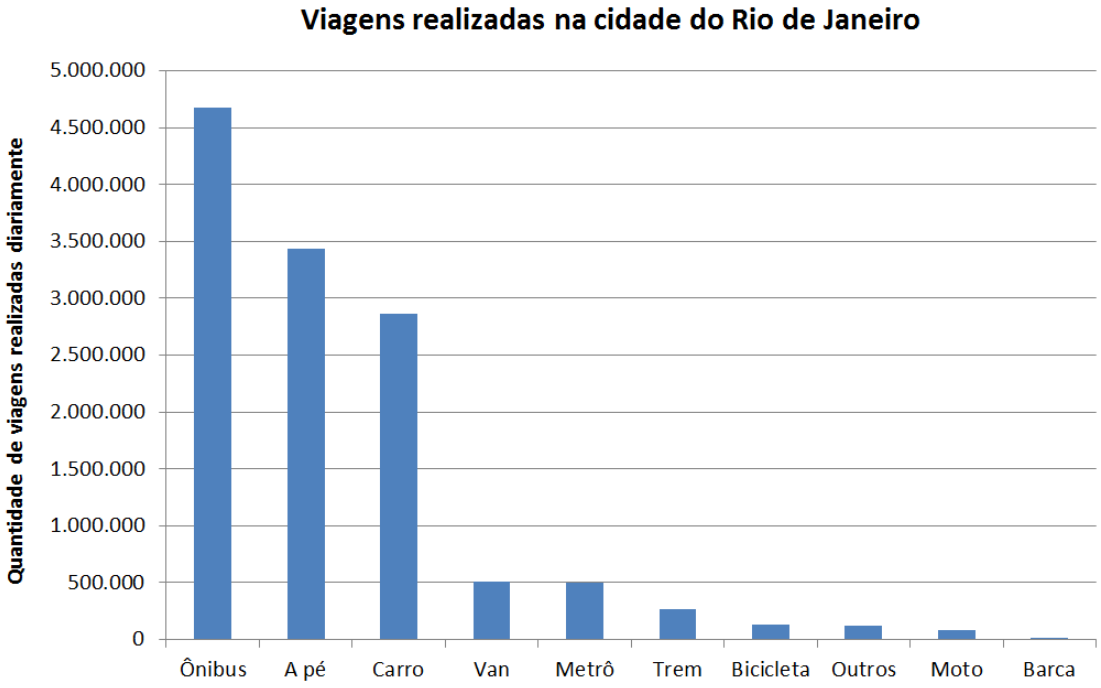


Figura 3 - Viagens realizadas na cidade do Rio de Janeiro por meio de transporte
Fonte: Adaptado de PMUS (2015)

A Figura 4 permite verificar que os transportes coletivos são responsáveis por aproximadamente 47,33% das viagens realizadas na cidade do Rio de Janeiro. Logo, os transportes coletivos representam mais que o dobro da quantidade de viagens realizadas de carro, o que ressalta a importância do sistema de transporte público para esta cidade.

Outro dado interessante observado na Figura 4 refere-se ao número de viagens realizadas de bicicleta na cidade do Rio de Janeiro que ainda é considerado muito pequeno, cerca de 1,02%, especialmente quando comparado com as viagens de carro, que são responsáveis por aproximadamente 22,74% do total. Porém, a quantidade de viagens de bicicleta já é superior às realizadas de moto.

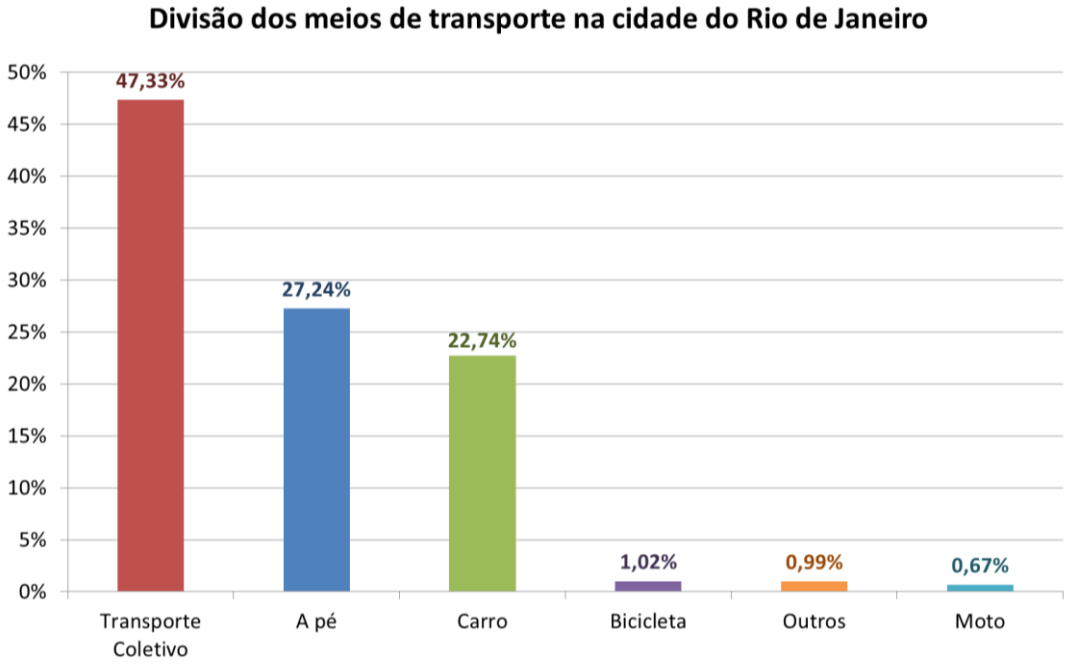


Figura 4 - Divisão dos meios de transporte no município do Rio de Janeiro
Fonte: Adaptado de PMUS (2015)

Na Figura 5 são consideradas somente as viagens realizadas por transporte coletivo, evidenciando a importância dos ônibus para os deslocamentos utilizando transporte público, visto que cerca de 78,38% dessas viagens são realizadas de ônibus, que é o meio de transporte mais utilizado no município do Rio de Janeiro.

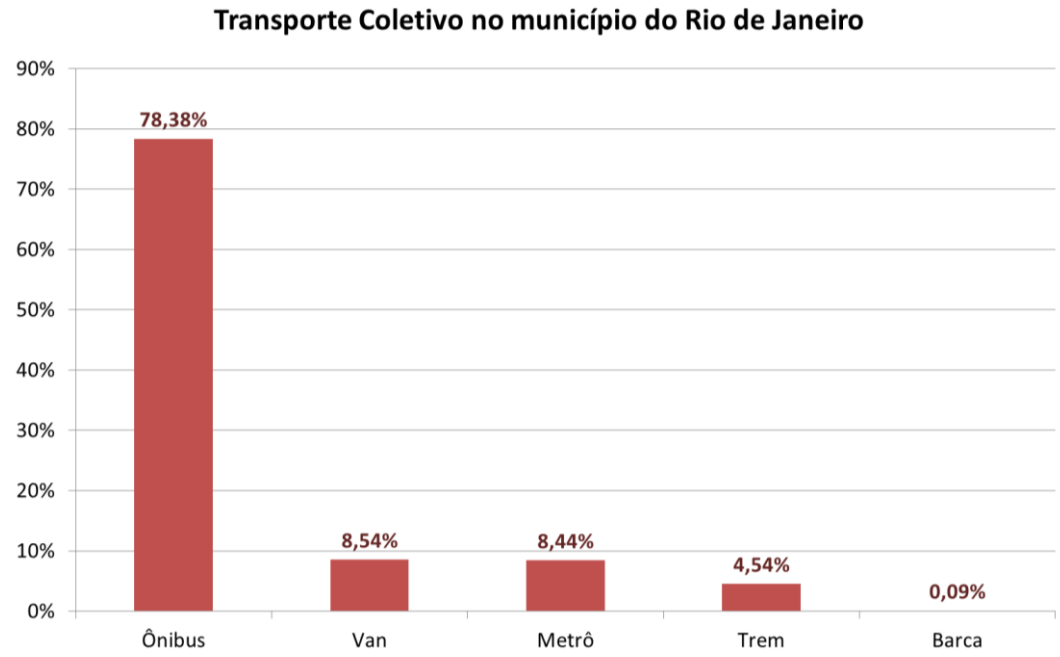


Figura 5 - Transporte público na cidade do Rio de Janeiro
Fonte: Adaptado de PMUS (2015)

Ao analisar apenas os meios de transporte motorizados torna-se ainda mais evidente a relevância dos ônibus para os deslocamentos no município do Rio de Janeiro, visto que mais de 50% das viagens realizadas com veículos motorizados nesta cidade são de ônibus, aproximadamente 51,71%. Seguido pelas viagens de carro que representam cerca de 31,70% do total. No entanto, mais de 65% dessas viagens são realizadas por transporte público. Conforme é indicado na Figura 6.

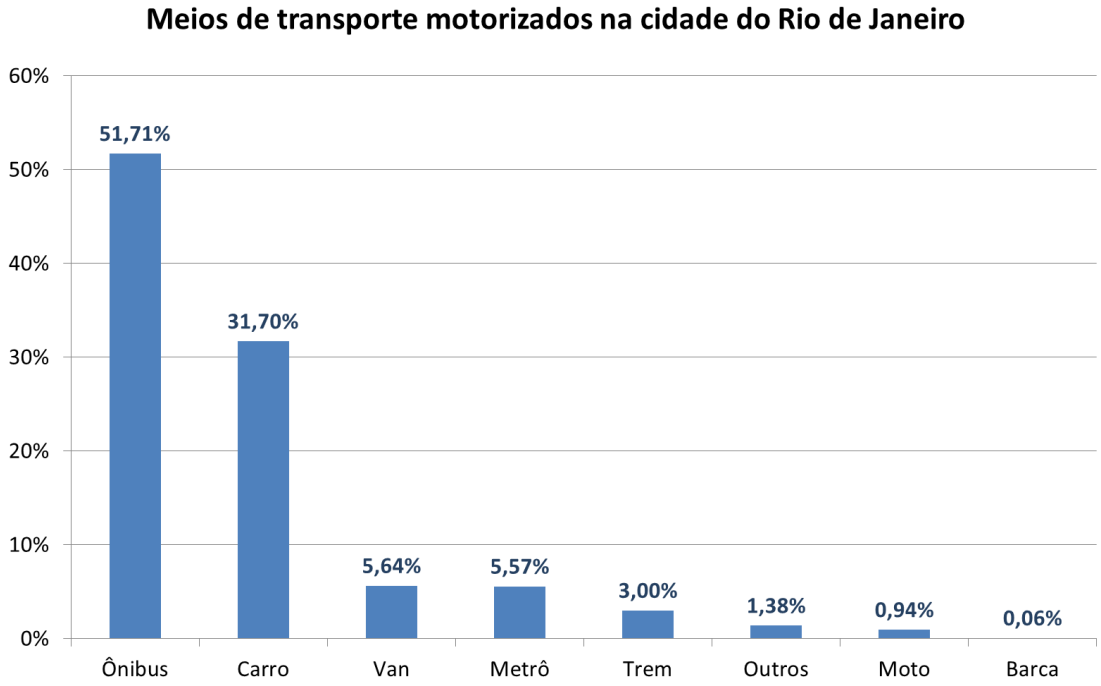


Figura 6 - Meios de transporte motorizados na cidade do Rio de Janeiro
Fonte: Adaptado de PMUS (2015)

A importância dos ônibus para a cidade do Rio de Janeiro também pode ser verificada na Figura 7, que mostra a evolução do movimento médio diário de passageiros nos transportes públicos rodoviário, ferroviário e hidroviário no município do Rio de Janeiro entre 1995 e 2016.

Na Figura 7 é possível observar que a quantidade média de passageiros por dia dos ônibus é muito superior a dos demais meios de transporte analisados. Além disso, nota-se que a partir de 2007 o número médio diário de passageiros dos ônibus cresceu continuamente, exceto em 2016, quando houve uma pequena queda.

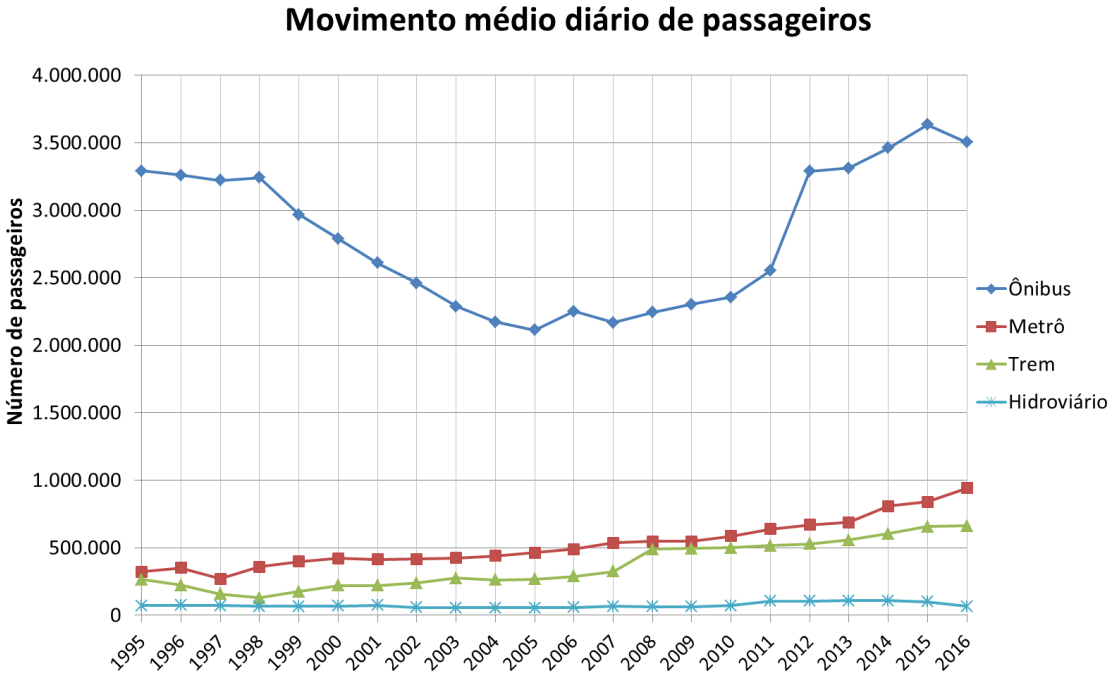


Figura 7 - Quantidade média diária de passageiros na cidade do Rio de Janeiro
Fonte: Adaptado de *Data* Rio (2017b)

Embora a maioria das viagens na cidade do Rio de Janeiro seja realizada de ônibus, sua frota é a que possui a menor quantidade de veículos, sendo superada pelos automóveis, motocicletas e veículos de carga, conforme apresentado na Figura 8.

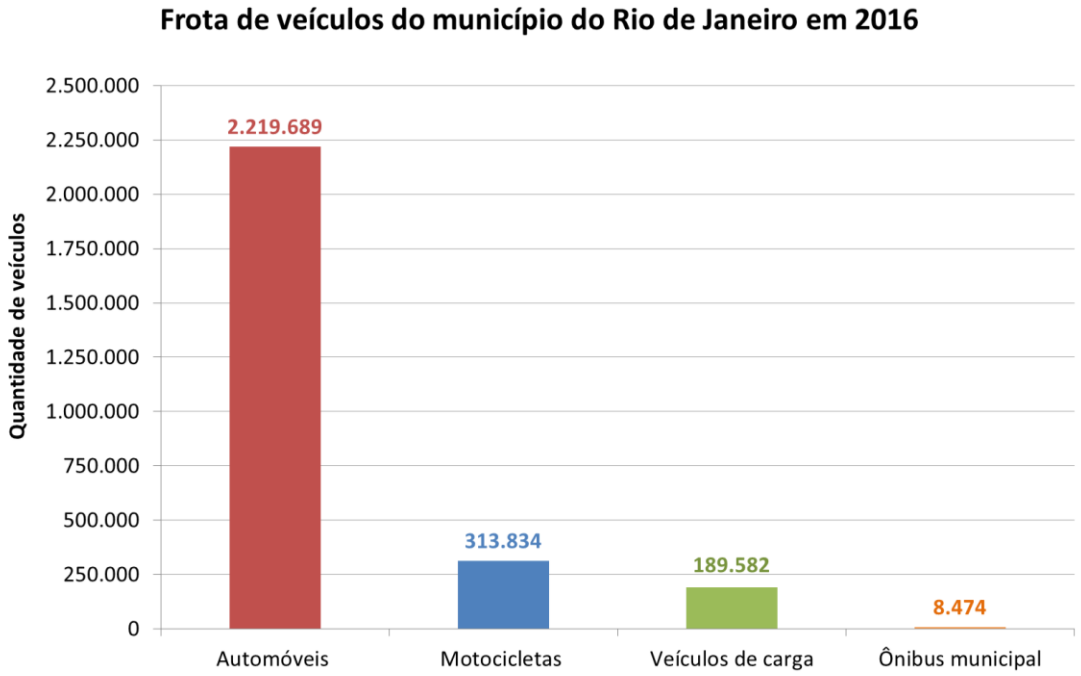


Figura 8 - Quantidade de veículos no município do Rio de Janeiro em 2016
Fonte: Adaptado de *Data* Rio (2017d)

Na Figura 8 é verificado que os automóveis representam cerca de 81,3% de toda a frota de veículos do município do Rio de Janeiro em 2016, enquanto os ônibus municipais constituem apenas 0,3% desta frota, com 8474 veículos.

Atualmente, a operação do sistema de ônibus da cidade do Rio de Janeiro é realizada em regime de concessão. As linhas de ônibus são divididas, conforme sua predominância, em quatro áreas da cidade e cada uma dessas áreas é operada por um consórcio de empresas de transporte público. As regiões de atuação desses consórcios (Santa Cruz, Transcarioca, Internorte e Intersul) são exibidas na Figura 9 (PREFEITURA DA CIDADE DO RIO DE JANEIRO, 2018c).



Figura 9 - Consórcios sistema de transporte público de ônibus
Fonte: Adaptado de Prefeitura da Cidade do Rio de Janeiro (2018c)

Além do ônibus comum também tem sido utilizado no Rio de Janeiro o BRT (*Bus Rapid Transit*) que, segundo a Fetranspor (2018), é um sistema de transporte público com infraestrutura específica composta por estações distribuídas em corredores exclusivos com pistas dedicadas somente para circulação de ônibus de alta capacidade (ônibus articulados). No Rio de Janeiro existem quatro corredores para os BRTs, são eles: TransOeste, TransCarioca, TransOlímpica e TransBrasil (que ainda está em fase de construção). O TransOeste foi o primeiro corredor exclusivo do BRT construído no Rio de Janeiro, inaugurado no ano de 2012. No entanto, para elaboração das redes analisadas neste estudo não foi considerado o BRT.

Outro projeto de mobilidade urbana implementado na cidade do Rio de Janeiro visando organizar o tráfego para aumentar a fluidez do trânsito foi o BRS (*Bus Rapid Service*), que consiste em uma faixa exclusiva para circulação de ônibus com escalonamento dos pontos de parada. A implantação do BRS na cidade do Rio de Janeiro teve início em 2011 (FETRANSPOR, 2018).

Para promover a utilização de meios de transporte sustentáveis, de modo a reduzir o uso de veículos motorizados, algumas cidades têm desenvolvido projetos de infraestrutura que incentivem e facilitem deslocamentos a pé, adoção de transporte coletivo e uso de bicicletas como meio de transporte (GÖSSLING, 2013). Com o intuito de estimular a utilização de bicicletas na cidade do Rio de Janeiro, a malha cicloviária da cidade tem sido expandida, como pode ser verificado na Figura 10, que mostra a evolução da extensão da malha cicloviária da cidade de 1990 até 2011. Em 2017, a cidade já possuía cerca de 420 km de ciclovias (PREFEITURA DA CIDADE DO RIO DE JANEIRO, 2018a).

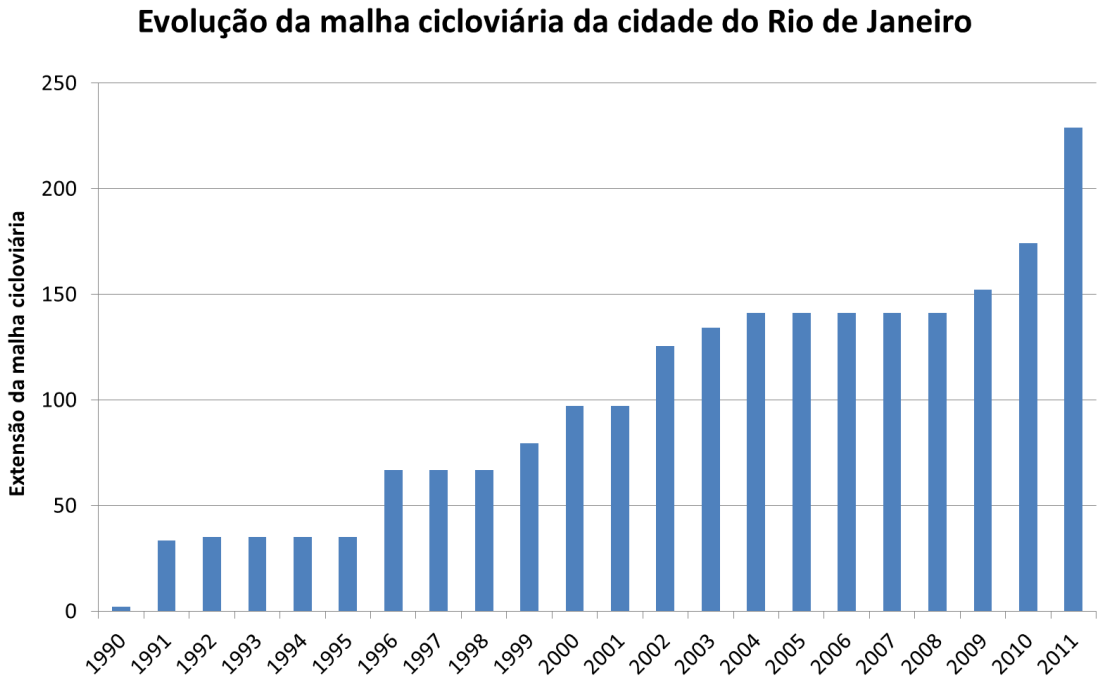


Figura 10 - Evolução da extensão da malha cicloviária da cidade do Rio de Janeiro
Fonte: Adaptado de *Data* Rio (2017a)

4. Bicicletas Compartilhadas

De acordo com Fishman (2016), programas de compartilhamento de bicicletas são formas de fornecimento de bicicletas que podem ser alugadas pelo próprio usuário em diversas estações distribuídas pela cidade. Esses programas também são chamados de *bicycle sharing*, *bikeshare*, *bikesharing*, bicicletas compartilhadas, bicicletas públicas, entre outras denominações.

Sendo assim, *bikesharing* é uma alternativa de transporte sustentável que pode ser definido como o uso compartilhado de uma frota de bicicletas, permitindo assim, a integração da bicicleta com o sistema de transporte da cidade. Tornando o ciclismo mais conveniente e atrativo para os usuários (SHAHEEN *et al*., 2010).

Os sistemas de bicicletas compartilhadas visam aumentar a acessibilidade da população, ligando as comunidades locais às estações de metrô e pontos de ônibus da cidade, de modo a priorizar os transportes coletivos, que contribuem para redução do trânsito e emissão de poluentes (HU; LIU, 2014).

Para DeMaio (2009), a evolução dos sistemas de compartilhamento de bicicletas ocorreu em três gerações. A primeira geração de programas de *bikesharing*, chamada de *White Bike*, foi lançada em 1965 na cidade de Amsterdam, na Holanda, neste momento não havia nenhum tipo de monitoramento das bicicletas, os usuários podiam coletar e abandonar a bicicleta em qualquer local sem pagar, por isso houve muitos casos de roubo e vandalismo. Já na segunda geração, lançada em grande escala na década de 90 em Copenhagen, na Dinamarca, as estações eram posicionadas em locais específicos sendo necessário depositar moedas como forma de pagamento para liberar as bicicletas, porém ainda assim ocorriam roubos, devido ao anonimato dos usuários.

Para resolver este problema, na terceira geração, iniciada na Universidade de Portsmouth na Inglaterra, o pagamento passou a ser feito por *smartcard*, permitindo assim a identificação dos usuários. Além disso, várias outras melhorias tecnológicas foram implementadas, como bloqueio eletrônico das bicicletas nas estações e acesso pelo celular. Prospecta-se uma quarta geração, na qual serão aprimoradas a eficiência e usabilidade do sistema, com melhorias no rastreamento, instalação e distribuição das bicicletas, além da oferta de bicicletas elétricas. Alguns programas de *bikesharing* atuais

já possuem alguns atributos da quarta geração, como é o caso dos sistemas de Gênova e Mônaco que possuem em sua frota bicicletas elétricas (DEMAIO, 2009).

Atualmente, a maioria dos programas de compartilhamento de bicicletas opera seguindo o modelo da terceira geração, utilizando como base do sistema a tecnologia da informação. Essas avançadas tecnologias permitem o rastreamento de informações do sistema e dos usuários e também a retirada e devolução das bicicletas nas estações. Sendo necessário cadastro no programa – fornecendo informações para identificação dos usuários e realizando o pagamento do serviço – para desbloquear as bicicletas nas estações (SHAHEEN *et al*., 2010).

Segundo DeMaio (2009), os operadores dos programas de *bikesharing* podem ser: governos locais, agências de transporte público, organizações sem fins lucrativos, empresas de publicidade, organizações privadas e universidades. Na Tabela 4 são apresentadas as vantagens e desvantagens de cada um deles.

Tabela 4 - Tipos de operadores de programas de *bikesharing*

Operador	Vantagem	Desvantagem
Governos locais	Maior controle governamental sob o programa.	Falta a experiência necessária para gestão do sistema.
Agências de transporte	Experiência na gestão de programas de *bikesharing* e a priorização do serviço prestado em detrimento da receita gerada.	Pode existir um operador mais qualificado do que a agência de transporte escolhida.
Organizações sem fins lucrativos	Transfere a responsabilidade pelo programa do governo para si.	São dependentes do financiamento público.
Empresas de publicidade	Absorvem os custos do programa.	Como não retêm a receita gerada pelo sistema (destinada ao governo) podem operar o programa de maneira inadequada.
Organizações privadas	Não dependem do governo, retendo assim, a receita gerada pelo programa e possuindo controle total sobre o serviço.	Podem não receber assistência financeira para operar o serviço e precisam de permissão para uso do espaço público.
Universidades	Total autonomia para expandir o serviço dentro do campus.	Limitação territorial, não beneficiando os bairros adjacentes. E podem ser incompatíveis com o serviço de *bikesharing* ofertado pelo governo.

Fonte: Adaptado de DeMaio (2009)

Os operadores de sistemas de *bikesharing* coletam em tempo real as informações sobre o fator de ocupação (proporção de vagas ocupadas por bicicletas dentro da estação), localização e capacidade máxima das estações (O'BRIEN *et al*., 2014).

Nos últimos anos, os programas de bicicletas compartilhadas têm ganhado cada vez mais destaque devido às iniciativas para aumentar a utilização de bicicletas como meio de transporte. Essas ações buscam reduzir os impactos ambientais do uso excessivo de automóveis, melhorar a qualidade de vida da população e integrar as bicicletas com outros meios de transporte (DEMAIO, 2009).

O crescente interesse em *bikeshare* resultou em um aumento do número de programas de bicicletas compartilhadas ao redor do mundo. Embora ainda haja uma grande preferência pelo transporte motorizado, nos últimos anos houve um aumento considerável do número de programas de *bikesharing* na Austrália e nos continentes europeu, americano e asiático, com maior concentração desses programas na Europa (SHAHEEN *et al*., 2010).

Um dos fatores que motivou este aumento considerável de programas de compartilhamento de bicicletas em todo mundo foi o lançamento em 2007 do sistema de *bikesharing* de Paris chamado de *Vélib'*, que obteve um sucesso maior do que o esperado, influenciando assim, no crescimento do interesse por este meio de transporte em vários países. A partir de 2008 os programas de *bikeshare* foram difundidos para além da Europa, sendo implementados em países da América do Sul, Ásia, Oceania e América do Norte (DEMAIO, 2009).

4.1. Desafios

Os maiores desafios dos programas de *bikesharing* são a escolha dos locais de instalação das estações de bicicletas, definição de uma estratégia de roteirização para redistribuição das bicicletas entre as estações, que inclua a localização dos depósitos onde são expedidos os caminhões para coleta e entrega de bicicletas de modo a balancear a demanda e a oferta (evitando que as estações fiquem completamente cheias ou vazias), e também a gestão eficiente do custo e sustentabilidade financeira de toda a operação (HU; LIU, 2014).

Além da operação do sistema, geralmente, a empresa responsável pelo programa de *bikesharing* também cobre os custos de instalação das estações, aquisição, manutenção e armazenagem das bicicletas (SHAHEEN *et al*., 2010).

Os custos de um programa de *bikesharing* podem ser divididos em três categorias: custo fixo, custo operacional e custo de tempo de viagem e redistribuição. O custo fixo representa os custos com aluguel das estações, estoque de bicicletas e depósito de expedição de bicicletas. Já o custo operacional consiste no custo de manutenção e da mão de obra. E o último é o custo com o tempo de viagem dos passageiros e com o tempo para redistribuição das bicicletas (HU; LIU, 2014).

Esses custos também podem ser descritos como custos de capital e custos operacionais. Custos de capital são os da fabricação das bicicletas e estações e também da compra do sistema e veículos de distribuição das bicicletas. E os custos operacionais consistem em custos com manutenção, distribuição, seguro, funcionários, eletricidade, armazéns e hospedagem do site. Podem ocorrer variações nesses custos dependendo do sistema, tamanho da frota e da população (DEMAIO, 2009).

As principais barreiras para a utilização de bicicletas compartilhadas, segundo não-usuários dos programas de *bikesharing*, são os fatores relacionados à conveniência (dirigir ser mais conveniente e longa distância entre as estações e casa/trabalho e o inconveniente de carregar um capacete ao longo do dia, nos países onde é obrigado a sua utilização) e à falta de segurança proporcionada pela ausência de uma infraestrutura adequada para circulação de bicicletas, que muitas vezes compartilham a pista com os demais veículos. Já os motivos que fariam essas pessoas usarem *bikeshare* também estão relacionados aos fatores citados acima, sendo eles: maior quantidade de ciclovias (segurança) e conveniência obtida com a proximidade das estações de bicicletas aos locais de trabalho e zonas residenciais (FISHMAN *et al*., 2014).

A falta de infraestrutura apropriada é um dos maiores obstáculos para a utilização de bicicletas, pois reduz a praticidade e segurança de usar este meio de transporte. Esta infraestrutura compreende, principalmente, ciclovias, ciclofaixas e bicicletários e também pode incluir instalações de apoio, como chuveiros nos locais de trabalho, por exemplo (DILL; VOROS, 2007).

Condições climáticas também influenciam na quantidade e duração das viagens realizadas de *bikeshare*. Fatores como a chuva, alta umidade, ventos de alta velocidade,

má iluminação e temperaturas extremas (frio ou calor intenso) reduzem o número e duração das viagens de bicicleta (GEBHART; NOLAND, 2014).

A topografia da região é outro fator que afeta consideravelmente o uso de bicicleta. Geralmente, são preferidas pelos ciclistas superfícies planas ou terrenos com elevações moderadas em detrimento de percursos com grandes variações nos níveis de elevação do terreno (DILL; VOROS, 2007).

Segundo Langford *et al.* (2013), a distância a ser percorrida também pode ser um obstáculo para os programas de compartilhamento de bicicletas, por isso, em alguns países, estão sendo integradas ao sistema de *bikesharing* as bicicletas elétricas. Elas operam de forma semelhante às bicicletas comuns, de modo que a maior diferença é o fato das bicicletas elétricas possuírem um motor elétrico que fornece energia extra para complementar a energia fornecida pelo usuário, aumentando assim, sua velocidade e reduzindo o desgaste físico do usuário, o que permite também o aumento da distância percorrida em menor tempo. Além disso, possuem vantagens similares as das bicicletas comuns, pois ainda requerem que o usuário forneça energia pedalando, propiciando benefícios para sua saúde, além de não agredirem o meio ambiente.

A manutenção dos programas de bicicletas compartilhadas também é um desafio, principalmente no caso das bicicletas elétricas, nos quais o sistema é ainda mais complexo, aumentando a necessidade de manutenção e custos quando comparado ao sistema composto somente por bicicletas comuns (LANGFORD *et al.*, 2013).

4.2. Benefícios

Nos últimos anos têm sido cada vez mais reconhecido os impactos negativos do uso excessivo de veículos motorizados, que afetam o meio ambiente e a saúde da população. A grande quantidade de automóveis nas ruas gera mais congestionamentos, aumentando assim, a poluição atmosférica e sonora além de contribuir para a redução da prática de atividades físicas, piorando a qualidade de vida da população. Este cenário tem provocado o aumento do interesse dos cidadãos pelo uso de bicicletas como meio de transporte, o que contribuiu diretamente para o crescimento do número de programas de compartilhamento de bicicletas ao redor do mundo (FISHMAN, 2016).

As bicicletas têm sido consideradas como o meio de transporte ideal no contexto urbano atual, pois contribuem para redução dos congestionamentos e da poluição sonora e atmosférica ao substituir os veículos motorizados, melhoram a qualidade de vida de seus usuários e não ocupam muito espaço no solo urbano, pois necessitam apenas de uma pequena área para instalação de suas estações (GÖSSLING, 2013).

Além disso, as bicicletas podem ser utilizadas como alimentadoras do transporte público, facilitando o acesso aos seus pontos de parada. Contribuindo assim, para redução do tempo gasto com esses deslocamentos até os pontos, que é uma das desvantagens do transporte público em comparação com os automóveis particulares que realizam o transporte porta a porta mais rapidamente (MARTENS, 2007).

Os principais benefícios oriundos da utilização de *bikeshare* são proporcionar mais opções de meios de transporte, economia financeira, aumento do uso de transporte público, melhoria da qualidade de vida dos usuários, integração com outros meios de transporte e redução da emissão de gases poluentes, congestionamentos e uso de combustível (SHAHEEN *et al*., 2010).

Segundo Fishman (2016), a maior conveniência, proporcionada pelas bicicletas compartilhadas, é uma das principais razões para sua utilização. Esta conveniência abrange diversos fatores, como a facilidade e rapidez na locomoção e proximidade das estações com o local de trabalho e residência dos usuários. Além disso, a economia financeira obtida com o uso de *bikeshare* também foi considerada como um dos principais motivos para sua utilização, visto que é possível utilizar as bicicletas compartilhadas como substitutas dos veículos particulares e até mesmo do transporte público, reduzindo assim, os custos com combustível e passagem, respectivamente.

O baixo custo de implantação e operação dos sistemas de compartilhamento de bicicletas, quando comparado com os outros serviços de transporte existentes, é outro ponto positivo desses programas (SHAHEEN *et al*., 2010).

A utilização de *bikeshare* também proporciona benefícios para saúde, a partir da prática de exercício físico, e para o meio ambiente, visto que a bicicleta é um meio de transporte sustentável que não gera poluição. Esses fatores em conjunto com a presença de estações de bicicletas próximas aos locais de trabalho contribuem para o aumento do número de usuários desses programas (FISHMAN *et al*., 2014).

A integração das bicicletas elétricas aos programas de *bikesharing* também pode contribuir para o aumento do uso das bicicletas compartilhadas ao reduzir obstáculos a sua utilização, como a distância da viagem e variações de terreno, por exemplo. Além de atrair o público que preza pelo conforto, velocidade e conveniência que as bicicletas elétricas propiciam em detrimento das bicicletas comuns (LANGFORD *et al.*, 2013).

De acordo com Shaheen *et al.* (2010), outro ponto positivo dos programas de *bikesharing* é o fato de proporcionarem a integração das bicicletas com os outros meios de transporte, preenchendo assim, as lacunas existentes dentro das redes de transporte público, que muitas vezes não se conectam. Além disso, esses programas tornam mais prática e democrática a utilização das bicicletas, ao facilitarem o acesso às mesmas, permitindo que todos utilizem este meio de transporte, até mesmo os que não possuem uma bicicleta particular. Dessa forma, os usuários desses sistemas usam as bicicletas conforme sua necessidade, sem precisar arcar com os custos de compra e manutenção de uma bicicleta particular.

4.3. Programas de *bikesharing* no mundo

Na última década houve um aumento considerável no número de programas de *bikesharing* ao redor do mundo. A maioria desses programas se concentra na Europa, onde foram lançados os primeiros sistemas de compartilhamento de bicicletas do mundo, seguido pelo continente asiático, que representa o mercado de *bikesharing* que tem crescido mais rapidamente nos últimos anos (SHAHEEN *et al*., 2010).

Atualmente, a China possui a maior frota de bicicletas compartilhadas do mundo (FISHMAN, 2016). O interesse pelas bicicletas surgiu devido ao grande aumento do uso de automóveis ocorrido neste país nos últimos anos. Visando reduzir os danos causados pelo uso excessivo de veículos motorizados, a China passou a priorizar meios de transporte sustentáveis, desenvolvendo estratégias para incentivar a utilização de bicicletas e transporte público. Assim, surgiram os primeiros programas de *bikesharing* que rapidamente se espalharam por todo o país. Com destaque para o *Hangzhou Public Bicycle*, lançado em 2008 na cidade de Hangzhou, que foi o primeiro sistema de compartilhamento de bicicletas da China a usar tecnologia da informação. Neste programa, financiado pelo governo local, o pagamento era realizado por um cartão que

o integrava com os outros sistemas de transporte público da cidade. No final de 2012, esse programa já possuía mais de 2960 estações e uma frota com mais de 69700 bicicletas, tornando-se um dos maiores e mais conhecidos programas de *bikesharing* do mundo (ZHAO *et al.*, 2014).

Um dos primeiros grandes sistemas de *bikesharing* lançados na Europa foi o *Vélo'v*, que foi um dos sistemas mais famosos da terceira geração das bicicletas compartilhadas. Este programa foi lançado no ano de 2005 em Lyon, na França, sendo responsável por um aumento de cerca de 50% da utilização de bicicleta na cidade. O *Vélo'v* é extremamente integrado com a rede de transporte público local, sendo situado, geralmente, próximo a estações de metrô e trem. Devido a sua localização e política de tarifas, este programa é praticamente uma extensão gratuita do sistema de transporte público da cidade. Outra vantagem deste sistema são os baixos custos de seus planos de associação (VOGEL *et al*., 2014).

Além do *Vélo'v* outro programa de compartilhamento de bicicletas famoso na França é o *Vélib*, implementado em Paris no ano de 2007. O *Vélib* é o maior sistema de *bikesharing* fora da China, possuindo, em 2009, 20600 bicicletas distribuídas por 1451 estações que funcionam 24h por dia durante toda a semana. Este programa oferece os primeiros 30 minutos de uso de graça, o que incentivou a sua utilização para pequenos percursos, aumentando em aproximadamente 70% o uso de bicicleta em Paris. Devido às altas taxas de utilização e tamanho deste sistema, é imprescindível uma gestão eficiente do mesmo para garantir a redistribuição adequada das bicicletas pelas estações (SHAHEEN *et al*., 2010).

De acordo com Gebhart e Noland (2014), um dos maiores programas de *bikesharing* dos Estados Unidos é o *Capital Bikeshare*, localizado em Washington, D.C. Este sistema foi lançado em 2010 substituindo o SmartBike D.C., que foi um programa experimental de *bikesharing* inaugurado em 2008. O *Capital Bikeshare* tem crescido progressivamente, aumentado a quantidade e a capacidade de suas estações. Além de Washington, D.C. também existem outras cidades nos Estados Unidos com grandes programas de *bikesharing*, como Nova York e Chicago, por exemplo.

O primeiro sistema de compartilhamento de bicicletas elétricas na América do Norte foi o *cycleUshare*, situado dentro do *campus* da Universidade de Tennessee, na cidade de Knoxville, nos Estados Unidos. Este sistema de *bikesharing* foi um projeto

experimental desenvolvido para verificar a experiência do usuário e analisar a viabilidade técnica e operacional deste sistema, que combina bicicletas elétricas com *bikesharing*. O *cycleUshare* é um sistema totalmente automatizado, composto por bicicletas elétricas e comuns, que facilita os deslocamentos dos estudantes e professores pelo *campus* da universidade (LANGFORD *et al.*, 2013).

A Austrália também possui programas de compartilhamento de bicicletas. Em 2010, foram lançados os programas de *bikesharing CityCycle* e *Melbourne Bike Share* nas cidades de Brisbane e Melbourne, respectivamente. No entanto, a taxa de utilização desses sistemas tem sido menor do que esperado. Um dos motivos que explica a baixa utilização desses sistemas é a lei existente na Austrália que obriga o uso de capacetes ao utilizar bicicletas (FISHMAN *et al.*, 2014).

O perfil dos usuários de programas de compartilhamento de bicicletas varia muito dependendo do país, o que pode ser justificado por diferenças culturais, sociais e econômicas, por exemplo. Sendo assim, mesmo existindo uma relação de fatores socioeconômicos (idade, gênero e renda) com a utilização de *bikeshare*, é difícil traçar um perfil universal dos usuários desses programas a partir destes fatores, visto que esta relação pode variar (HEINEN, 2010).

No entanto, os programas de compartilhamento de bicicletas, comumente, são utilizados por um tipo específico de usuário. Composto por homens brancos, jovens e empregados, com nível educacional superior ao da maioria da população e que muito provavelmente já usavam bicicleta antes de aderir ao *bikeshare* (RICCI, 2015).

Segundo Fishman (2016), em relação ao gênero, geralmente existe uma maior incidência de homens utilizando bicicletas compartilhadas, porém isso varia para cada país. Em países como a Holanda, onde o ciclismo é muito praticado, a infraestrutura é adequada para utilização de bicicletas como meio de transporte, havendo assim, maior número de mulheres usuárias de *bikeshare*. Tendo em vista que, normalmente, o público feminino se preocupa mais com fatores relacionados à segurança, como a existência de ciclovias, por exemplo.

Quanto à faixa etária, geralmente, os usuários regulares de bicicletas são, em sua maioria, jovens adultos (entre 18 e 34 anos). Isso ocorre, pois, normalmente, a prática do ciclismo é reduzida com o avanço da idade, principalmente no caso dos idosos que, muitas vezes, são incapazes de realizar esta atividade física (DILL; VOROS, 2007).

Porém, pessoas que utilizam as bicicletas para viagens de ida e volta do trabalho/faculdade/escola, por exemplo, se concentram na faixa etária de 36 a 40 anos. Sendo assim, esta relação entre idade e uso de bicicleta não é universal, visto que a faixa etária predominante pode mudar dependendo do país e propósito das viagens (MORITZ, 1997).

No que tange a renda, usualmente, os indivíduos com renda menor utilizam menos os sistemas de *bikesharing*. Além da questão monetária, esse padrão pode existir devido à localização das estações de bicicletas, que são distribuídas em menor número ou até mesmo não existem em áreas mais carentes (FISHMAN *et al*., 2013).

O padrão de uso diário das bicicletas compartilhadas varia muito para cada país. Geralmente, os picos de uso de *bikeshare* durante a semana são de 7 às 9 horas e de 16 às 18 horas, que usualmente é o horário de ida e volta do trabalho. Já nos finais de semana o horário de pico costuma ser no meio do dia (FISHMAN, 2016).

As viagens de *bikeshare* realizadas nos fins de semana costumam ser mais longas que as realizadas nos horários de pico durante a semana. Isso sugere que nos fins de semana as bicicletas compartilhadas são utilizadas, provavelmente, para lazer (GEBHART, K; NOLAND, 2014).

4.4. *Bikesharing* no Rio de Janeiro

O *Bike* Rio é o sistema de compartilhamento de bicicletas do Rio de Janeiro. Este programa é uma iniciativa da Prefeitura do Rio de Janeiro visando incentivar o uso de transporte sustentável para curtas distâncias e facilitar a locomoção dos cidadãos pela cidade, por meio de bicicletas distribuídas em estações localizadas em pontos estratégicos da cidade (PREFEITURA DA CIDADE DO RIO DE JANEIRO, 2017).

Este sistema de *bikesharing* teve início em outubro de 2011, sendo o primeiro programa de compartilhamento de bicicletas do Brasil. Até 2017, a implantação e operação do *Bike* Rio eram realizadas pela empresa SAMBA Transportes Sustentáveis do Grupo Serttel, que venceu a licitação realizada pela prefeitura para execução deste serviço, com o Banco Itaú como patrocinador do projeto. Em 2018, a empresa Tembici passou a ser responsável por operar este programa, ainda com patrocínio do Banco Itaú (PREFEITURA DA CIDADE DO RIO DE JANEIRO, 2017).

Com a mudança da empresa responsável pela implantação e operação deste sistema, as bicicletas e estações do *Bike* Rio foram substituídas por modelos mais modernos.

Na Figura 11 é comparado o modelo antigo (à esquerda) com o modelo atual (à direita) das bicicletas do *Bike* Rio. Além de possuírem sistema antifurto, as novas bicicletas têm um *design* mais moderno e são mais resistentes, seguras, confortáveis e ergonômicas.



Figura 11 - Bicicleta antiga versus Bicicleta atual do *Bike* Rio
Fonte: Elaboração Própria

As bicicletas do *Bike* Rio possuem tecnologias de rastreamento que permitem a verificação da quantidade de bicicletas presentes em cada estação. Além disso, o pagamento é realizado via cartão de crédito o que proporciona maior controle por parte do operador do sistema, pois possibilita a identificação do usuário, reduzindo assim, casos de roubos e atos de vandalismo.

As estações de bicicletas também sofreram alterações, conforme pode ser observado na Figura 12, na qual é comparado o modelo antigo (à esquerda) com o modelo atual (à direita) das estações do *Bike* Rio. As novas estações possuem painéis solares que geram a energia necessária para o funcionamento das mesmas e são equipadas com vagas inteligentes que facilitam o desbloqueio das bicicletas nas estações.



Figura 12 - Estação antiga versus Estação atual do *Bike* Rio
Fonte: Elaboração Própria

O *Bike* Rio funciona 18 horas por dia durante toda a semana, sendo permitida a realização de ilimitadas viagens de no máximo 1 hora com intervalos de 15 minutos entre viagens. A retirada da bicicleta na estação é realizada por aplicativo no celular ou via cartão do usuário do sistema, sendo necessária a realização prévia de um cadastro no sistema para utilizar as bicicletas. Após o cadastramento é possível adquirir uma das opções de plano, diário ou mensal, no valor de R$ 5,00 e R$ 10,00, respectivamente (*BIKE* RIO, 2018).

O sistema de *bikesharing* do Rio de Janeiro é pequeno quando comparado com os de outras cidades citadas neste estudo. No entanto, possui alta taxa de utilização, principalmente nos fins de semana e feriados, quando é usado, geralmente, por turistas. Isso ocorre devido à localização das estações, sendo muitas delas próximas a praias e também pelo clima da cidade, que favorece a prática de exercícios físicos. Durante a semana o sistema é usado com maior frequência no horário de ida e volta do trabalho (O'BRIEN *et al*., 2014).

Quanto à infraestrutura da cidade do Rio de Janeiro, para incentivar a utilização de meios de transporte sustentáveis foi realizada uma expansão das ciclovias da cidade. De acordo com a Prefeitura da Cidade do Rio de Janeiro (2018a), em 2017 a cidade possuía cerca de 420 km de ciclovias, conforme é apresentado no mapa cicloviário da cidade na Figura 13.



Figura 13 - Mapa cicloviário da cidade do Rio de Janeiro em 2017
Fonte: Adaptado de *Data* Rio (2017c)

Além disso, ainda existem ciclovias sendo projetadas e construídas na cidade do Rio de Janeiro. Como pode ser observado no mapa da Figura 14, no qual é indicado o *status* da malha cicloviária da cidade no ano de 2017. Neste mapa é possível verificar as rotas cicloviárias já implantadas, as que estão em construção e onde estão sendo projetadas as novas rotas.



Figura 14 - Mapa cicloviário da cidade do Rio de Janeiro com status das estações
Fonte: Adaptado de *Data* Rio (2017c)

No mapa da Figura 15 são discriminadas as diferentes tipologias da malha cicloviária da cidade do Rio de Janeiro no ano de 2017. Sendo possível verificar a existência de quatro tipos de vias de circulação de bicicletas, sendo elas: ciclovia, ciclofaixa, via compartilhada e faixa compartilhada.

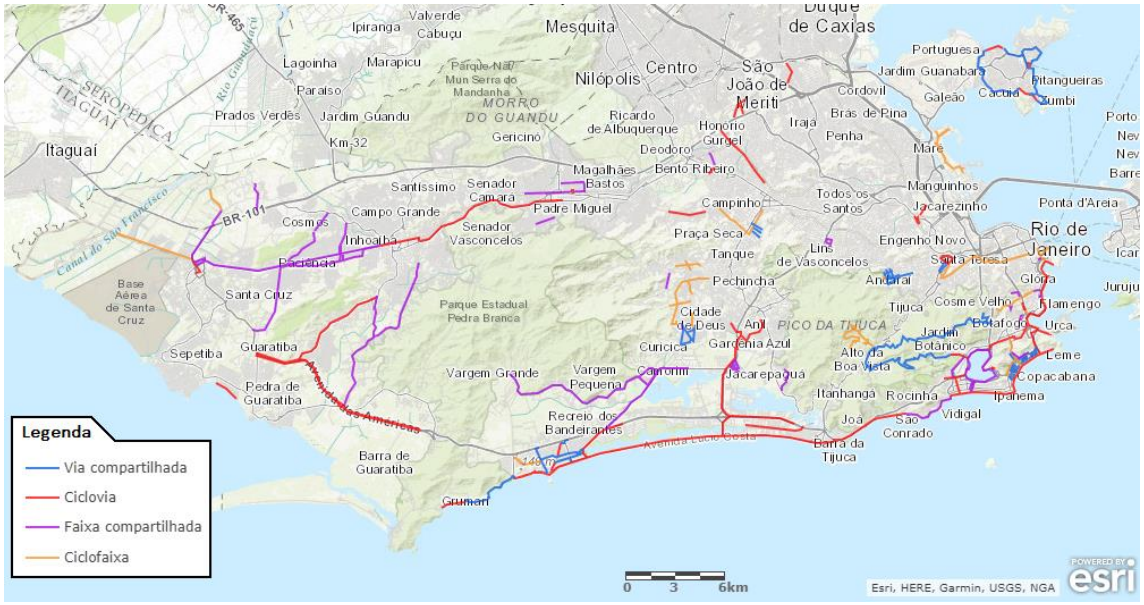


Figura 15 - Mapa das tipologias da malha cicloviária da cidade do Rio de Janeiro
Fonte: Adaptado de *Data* Rio (2017c)

A ciclovia é uma pista separada fisicamente do tráfego comum, dedicada, exclusivamente, para a circulação de ciclos (veículos com pelo menos duas rodas movidos pela força humana), como as bicicletas, por exemplo. A ciclofaixa também é destinada unicamente aos ciclos, porém constitui uma parte da via sendo delimitada por meio de sinalização adequada, como linhas separadoras na pista (BRASIL, 1997). As vias compartilhadas são pistas onde as bicicletas podem transitar junto com os demais veículos, já as faixas compartilhadas são ruas que permitem a circulação de bicicletas e pedestres.

Os mapas da rede cicloviária da cidade do Rio de Janeiro apresentados neste capítulo foram construídos com base no Mapa Digital do Rio de Janeiro, a partir de uma parceria entre o Instituto Pereira Passos (IPP) e a Secretaria Municipal de Meio Ambiente (SMAC), com apoio da ONG Transporte Ativo (DATA RIO, 2017c).

5. Metodologia

Este estudo consiste em uma análise quantitativa utilizando o modelo topológico de rede de transporte público denominado P-*space*, para análise da integração das bicicletas compartilhadas do *Bike* Rio com a rede de ônibus da cidade do Rio de Janeiro.

A metodologia elaborada para este projeto busca analisar e comparar a rede de ônibus da cidade do Rio de Janeiro com esta mesma rede integrada com as bicicletas compartilhadas. Visando investigar o impacto dessas bicicletas na rede de ônibus da cidade, a partir de uma análise comparativa das propriedades das redes geradas.

A estrutura metodológica deste estudo foi dividida em cinco etapas principais, conforme está representado na Figura 16, que também mostra as ferramentas utilizadas em cada uma das fases do projeto. Essas etapas são explicadas detalhadamente no decorrer deste capítulo.

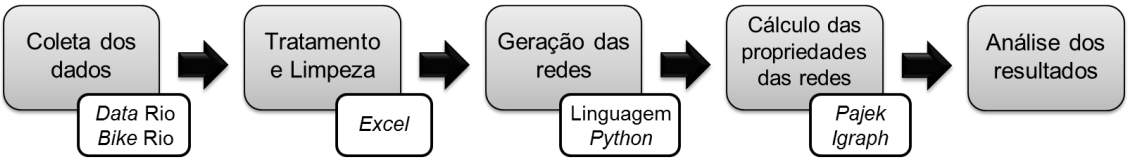


Figura 16 - Estrutura metodológica do projeto
Fonte: Elaboração Própria

Primeiramente, foi realizada a coleta dos dados sobre os ônibus e bicicletas compartilhadas. Os dados utilizados neste estudo referentes às linhas de ônibus e localização de seus pontos de parada na cidade do Rio de Janeiro foram obtidos no site *Data* Rio, que é um portal de dados abertos da prefeitura do Rio de Janeiro. Este portal disponibiliza acesso a diversas informações sobre a cidade organizadas em categorias, como saúde, educação, transporte, entre outras. Para este estudo foram usados os dados sobre transporte rodoviário municipal de passageiros, fornecidos por meio do GPS (*Global Positioning System*) instalado nos ônibus da cidade.

Esses dados foram extraídos do site *Data* Rio em arquivo no formato GTFS (*General Transit Feed Specification*), contendo informações sobre a operação dos ônibus da cidade do Rio de Janeiro. Neste arquivo são apresentados o número e nome das linhas de ônibus, as coordenadas (latitude e longitude) de seus respectivos pontos de

parada, a agência responsável pela linha, entre outras informações. Esses dados dos ônibus são referentes ao ano de 2016, quando foi realizada a última atualização deste arquivo até o momento da finalização deste estudo.

Além dessa informação, também foram coletados os dados sobre a localização das estações de bicicletas do *Bike* Rio, a partir de informações disponibilizadas em seu site em janeiro de 2017.

Como não houve mudanças significativas nas linhas e pontos de ônibus de 2016 para 2017, é possível relacionar os dados dos ônibus de 2016 com os dados das bicicletas compartilhadas de 2017 sem perda da validade deste trabalho.

Contudo, é importante destacar que foi considerada como premissa deste estudo que os dados obtidos nos sites do *Bike* Rio e *Data* Rio existiam e eram confiáveis. Por este motivo, não foi apurado se as linhas de ônibus realmente existiam e se as coordenadas de seus pontos de parada e das estações de bicicletas estavam corretas.

Após a coleta dos dados foi executado o pré-processamento dos mesmos. Nesta etapa foi realizado o tratamento e limpeza dos dados, sendo organizadas as informações pertinentes ao trabalho e removidos os dados discrepantes e irrelevantes para este estudo. A preparação e limpeza dos dados foram feitas utilizando o software *MS Excel*.

As informações utilizadas neste projeto presentes nos dados dos ônibus são referentes à localização dos pontos de parada (latitude e longitude) de cada linha de ônibus que transita no município do Rio de Janeiro. Já as informações usadas neste estudo obtidas nos dados das bicicletas compartilhadas mostram o posicionamento das estações de bicicletas do *Bike* Rio na cidade a partir de sua latitude e longitude. Com esses dados foi possível construir as redes que são analisadas no decorrer deste estudo.

Depois da realização do pré-processamento, foram identificados 377 linhas de ônibus, 6656 pontos de parada e 249 estações de bicicletas presentes na cidade do Rio de Janeiro.

No entanto, devido à concentração das estações de bicicletas em algumas regiões específicas da cidade, foi realizada uma delimitação da área de estudo, na qual foram definidas como áreas de interesse os locais com maior número de estações de bicicletas do *Bike* Rio, que são: Barra da Tijuca, Recreio dos Bandeirantes, Centro, zona sul da cidade do Rio de Janeiro e parte da Tijuca e Maracanã. Sendo verificada, neste caso, a presença de 234 linhas de ônibus, 1300 pontos de parada e 242 estações de bicicletas.

Para inserir os pontos de ônibus e estações de bicicletas no mapa do Rio de Janeiro, de acordo com suas coordenadas (latitude e longitude), foi utilizado o *Google Fusion Tables*.

Em seguida foram geradas as redes do P-*space*, P-*space* Aumentado, P-*space* Pedestres, P-*space* Aumentado Pedestres, P-*space* Limitado, P-*space* Aumentado Limitado, P-*space* Limitado Pedestres e P-*space* Aumentado Limitado Pedestres, que foram analisadas utilizando as seguintes propriedades de redes: grau médio, densidade, distância média, diâmetro, número de arestas e medidas de centralidade (proximidade, intermediação e grau).

O algoritmo responsável por gerar essas redes foi desenvolvido na linguagem de programação *Python*. Já as propriedades das redes foram obtidas por meio do software *Pajek* e do pacote da linguagem de programação *Python* chamado de *igraph*.

Por fim, foram analisados e comparados os resultados obtidos, de modo a verificar o impacto das bicicletas compartilhadas na rede de ônibus da cidade do Rio de Janeiro a partir da análise das propriedades das redes geradas.

Foi considerado como limitação deste estudo, o fato do mesmo analisar somente a rede de ônibus do município do Rio de Janeiro, não abrangendo os demais meios de transporte público da cidade.

5.1. Algoritmo para geração das redes

Neste trabalho foi gerado um conjunto de redes para analisar o impacto da utilização das bicicletas compartilhadas como alimentadoras dos ônibus da cidade do Rio de Janeiro. Para isso foram considerados diversos fatores, como o deslocamento realizado pelo pedestre entre pontos de ônibus e também a concentração das estações de bicicletas do *Bike* Rio em algumas áreas específicas da cidade.

Para geração das redes analisadas neste estudo foi desenvolvido um algoritmo utilizando a linguagem de programação *Python*. Os principais passos seguidos para elaboração deste código são apresentados na Figura 17. Este algoritmo é explicado de forma mais detalhada no capítulo seis que aborda a modelagem do problema.

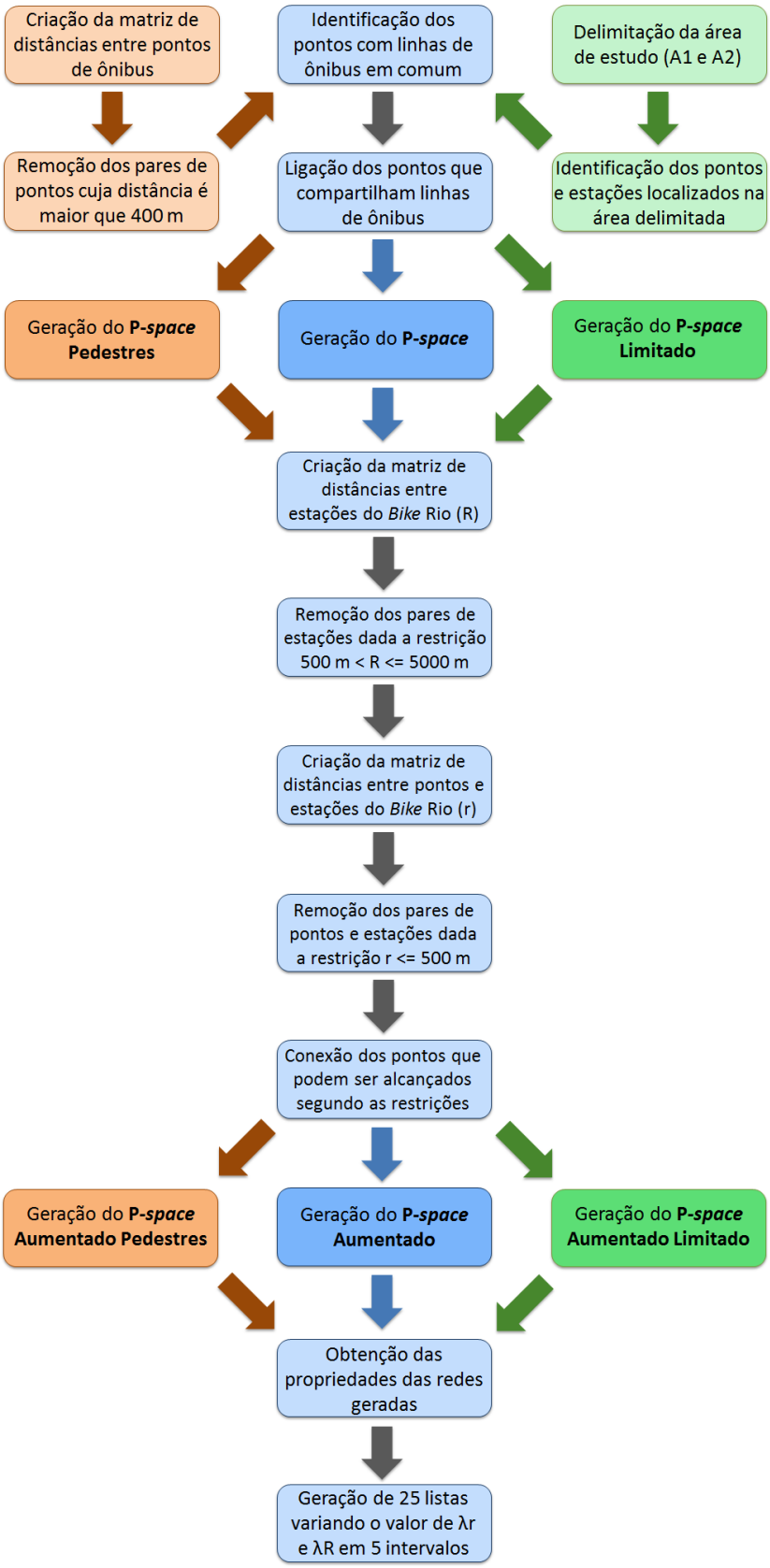


Figura 17 - Fluxograma do algoritmo desenvolvido
Fonte: Elaboração Própria

Na Figura 17 os passos seguidos para elaboração do código desenvolvido são divididos em três cores que representam os processos de criação das redes geradas neste estudo. Em laranja são exibidos os passos para geração do P-*space* Pedestres e P-*space* Aumentado Pedestres. Enquanto em azul são mostradas as fases para criação do P-*space* e P-*space* Aumentado. E em verde são apresentadas as etapas para geração do P-*space* Limitado e P-*space* Aumentado Limitado. As ações em azul são comuns aos três processos, exceto a geração das redes (destacada em tom mais escuro).

As redes P-*space* Limitado Pedestres e P-*space* Aumentado Limitado Pedestres não estão presentes no fluxograma da Figura 17, pois foram elaboradas a partir da combinação do P-*space* Limitado com o P-*space* Pedestres e do P-*space* Aumentado Limitado com o P-*space* Aumentado Pedestres, respectivamente.

Para a geração do P-*space* Pedestres e P-*space* Aumentado Pedestres (processo em laranja), primeiramente, foi criada uma matriz com os valores das distâncias entre os pontos de ônibus. Posteriormente, foram classificados do menor para o maior valor da distância, sendo removidos os pares de pontos de ônibus com distância igual a zero ou maior que 400 m.

Já para gerar o P-*space* Limitado e P-*space* Aumentado Limitado (processo em verde), inicialmente foi delimitada a área de estudo, sendo demarcadas duas áreas de interesse. Em seguida foram identificados todos os pontos de ônibus e estações de bicicletas presentes nessas regiões.

No caso do processo de geração do P-*space* e P-*space* Aumentado (processo em azul), em um primeiro momento foram identificados e conectados os pontos de ônibus que compartilham linhas de ônibus. Essas ações também foram realizadas nos outros processos (em laranja e verde). Após a ligação desses pontos de ônibus foram geradas as redes P-*space*, P-*space* Pedestres, P-*space* Limitado e P-*space* Limitado Pedestres.

Posteriormente, para cada um dos três processos, foi criada a matriz de distâncias entre estações de bicicletas do *Bike* Rio, sendo removidos os pares de estações de bicicletas que não respeitavam a restrição $\lambda R_1 < R \leq \lambda R_2$, na qual R consiste na distância percorrida de bicicleta entre duas estações de bicicletas e λR_1 e λR_2 são iguais a 1000 m e 5000 m, respectivamente. Também foi elaborada a matriz de distâncias entre pontos de ônibus e estações de bicicletas, sendo retirados os pares de pontos e estações que não estavam de acordo com a restrição $r \leq \lambda r_1$, na qual r equivale

à distância caminhada pelo pedestre entre o ponto de ônibus e a estação de bicicleta, e vice-versa, e λr_1 é igual a 500 m. Logo, neste modelo λr_1, λR_1 e λR_2 são parâmetros associados às variáveis r e R.

A partir dessas matrizes foram conectados os pares de pontos de ônibus que poderiam se alcançar com a utilização das bicicletas do *Bike* Rio como alimentadoras dos ônibus. Assim, foram geradas as redes P-*space* Aumentado, P-*space* Aumentado Pedestres, P-*space* Aumentado Limitado e P-*space* Aumentado Limitado Pedestres.

Em seguida foram obtidas as principais propriedades de todas as redes geradas, sendo elas o número de arestas, densidade, grau médio, distância média, diâmetro, distribuição de distâncias e centralidades (grau, proximidade e intermediação).

Por fim, foram geradas 25 redes, segundo as restrições $R \leq \lambda R$ e $r \leq \lambda r$, variando o valor dos parâmetros λR de 1000 m a 5000 m em intervalos de 1000 m e o de λr de 100 m a 500 m em intervalos de 100 m. Visando analisar a variação do valor das propriedades dessas 25 redes geradas.

As distâncias euclidianas medidas neste algoritmo foram calculadas pela fórmula de *Haversine*, que fornece a distância entre dois pontos a partir de suas latitudes e longitudes.

5.2. Análise das propriedades das redes

As propriedades das redes geradas neste estudo foram analisadas no contexto referente à rede de transporte público de ônibus, ou seja, os valores dessas propriedades foram interpretados de acordo com este meio de transporte para o modelo topológico de RTP denominado P-*space*. A seguir são atribuídos significados para cada uma das propriedades obtidas neste projeto.

- **Vértices:** os vértices representam os pontos de ônibus.
- **Arestas:** a quantidade de arestas equivale ao número de deslocamentos possíveis entre pontos de ônibus utilizando apenas uma linha de ônibus, ou seja, sem fazer baldeação.
- **Grau:** o grau de um vértice (ponto de ônibus) corresponde ao número de pontos de parada que se pode alcançar a partir de um determinado ponto de ônibus utilizando apenas uma linha de ônibus.

- **Densidade:** a densidade mostra a proporção de deslocamentos possíveis entre pontos utilizando somente uma linha de ônibus. Quanto maior a densidade, maior é a quantidade de deslocamentos entre pontos realizados sem a necessidade de baldeação, ou seja, sem troca de linhas de ônibus.
- **Distância:** a distância entre pares de vértices indica a quantidade de linhas de ônibus necessárias para se deslocar entre os pontos de ônibus analisados. Sendo assim, pode-se obter também o número de baldeações necessárias para se locomover entre os pontos.
- **Diâmetro:** o diâmetro mostra o número máximo de linhas de ônibus necessárias para se deslocar entre o par de pontos de ônibus localizados mais distantes entre si na rede. Sendo assim, apresenta a quantidade máxima de linhas necessárias para se deslocar entre qualquer par de pontos de ônibus na cidade.
- **Centralidade de Grau:** o vértice mais central na centralidade de grau é aquele que possui maior grau. Ou seja, é o ponto de ônibus a partir do qual se pode alcançar o maior número de pontos da cidade utilizando apenas uma linha de ônibus, sendo assim, é o ponto de ônibus que possui mais possibilidades de destinos diferentes.
- **Centralidade de Intermediação:** o vértice mais central na centralidade de intermediação é aquele que mais vezes está presente no trajeto entre outros pares de pontos de ônibus, sendo um intermediário entre o ponto de origem e destino. Logo, é o ponto de ônibus que conecta a maior quantidade de pares de pontos cujo percurso não pode ser realizado utilizando apenas uma linha de ônibus. Quando este valor é elevado indica que o ponto de ônibus é frequentemente utilizado como ponto de troca de linhas, ou seja, onde mais ocorre baldeação.
- **Centralidade de Proximidade:** o valor da centralidade de proximidade indica o quão próximo um ponto de ônibus está dos demais. Ou seja, o vértice mais central é aquele cuja distância em relação aos outros pontos da rede é menor. Quando este valor é elevado, o ponto de ônibus é considerado mais apropriado para se tornar um possível terminal rodoviário.

6. Modelagem do Problema

Para análise do impacto das bicicletas compartilhadas na mobilidade urbana da cidade do Rio de Janeiro, mais especificamente na rede de transporte público de ônibus, foram criadas neste estudo oito redes, a partir do modelo topológico P-*space*, denominadas P-*space*, P-*space* Aumentado, P-*space* Pedestres, P-*space* Aumentado Pedestres, P-*space* Limitado, P-*space* Aumentado Limitado, P-*space* Limitado Pedestres e P-*space* Aumentado Limitado Pedestres.

O P-*space* Aumentado é uma rede desenvolvida neste trabalho por meio da integração das estações de bicicletas do *Bike* Rio com a rede de ônibus da cidade do Rio de Janeiro. A partir desta rede foram criadas as redes P-*space* Aumentado Pedestres, que considera o deslocamento realizado pelos pedestres entre pontos de ônibus, P-*space* Aumentado Limitado, que delimita a região analisada focando nas áreas com maior concentração de estações de bicicletas e P-*space* Aumentado Limitado Pedestres, que é uma combinação das duas redes citadas anteriormente.

Para geração dessas redes, primeiramente foi elaborado o P-*space*, que é uma rede, na qual os vértices são pontos de parada que são conectados por arestas quando possuem pelo menos uma linha de ônibus em comum. Na Figura 18 é apresentado como é obtido o P-*space*, a partir do B-*space* que também é responsável por gerar o C-*space*.

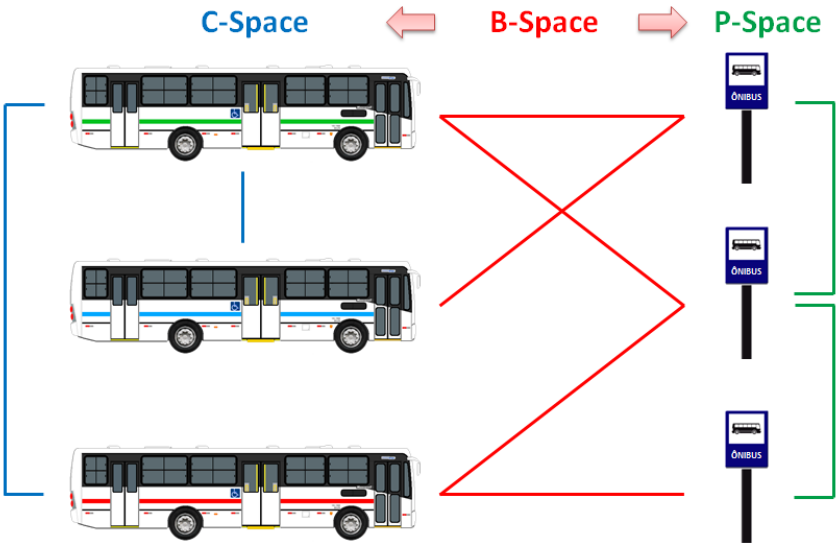


Figura 18 - Representação dos modelos topológicos de redes de transporte público
Fonte: Elaboração Própria

Na Figura 18 é possível observar que no B-*space* as linhas de ônibus são conectadas com seus respectivos pontos de parada, sendo assim uma rede bipartida composta por dois subconjuntos, um de linhas de ônibus e outro de pontos de parada. A partir desta rede são obtidos o C-*space*, que liga as linhas de ônibus que compartilham pontos de parada, e o P-*space*, que é o modelo topológico utilizado neste estudo.

6.1. P-*space* Aumentado

Após a elaboração do P-*space* foram identificadas as localizações de todas as estações do *Bike* Rio. Com esses dados foi criado o P-*space* Aumentado, que integra as bicicletas do *Bike* Rio com os ônibus da cidade a partir da utilização dessas bicicletas como alimentadoras dos ônibus. Conforme pode ser observado na Figura 19.

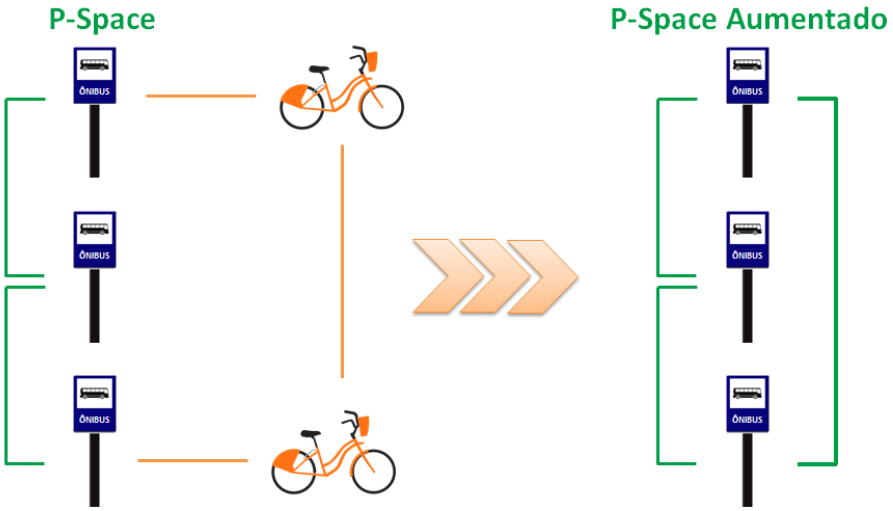


Figura 19 - Processo para obtenção do P-*space* Aumentado
Fonte: Elaboração Própria

A Figura 19 ilustra o modelo desenvolvido neste estudo, denominado P-*space* Aumentado. Neste modelo de rede um par de pontos de ônibus é conectado quando forem respeitadas as seguintes restrições:

- Os pontos de ônibus devem estar localizados a uma distância razoável das estações de bicicletas, de modo que seja possível o deslocamento a pé do pedestre.
- A distância entre as estações de bicicletas deve ser tal, que seja aceitável, de modo geral, a realização deste percurso utilizando uma bicicleta.

No esquema apresentado na Figura 20, o P-*space* é composto por círculos (vértices) em verde e amarelo que representam os pontos de ônibus que são conectados entre si por arestas ao compartilharem pelo menos uma linha de ônibus que os tenham como ponto de parada. Enquanto os triângulos em vermelho representam as estações de bicicletas. Nesse caso observa-se que não é possível se deslocar de ônibus de um ponto em amarelo para um ponto em verde, visto que eles não possuem linhas em comum.

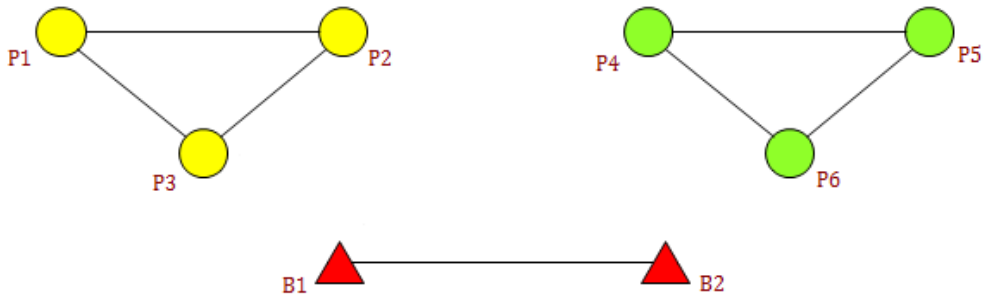


Figura 20 - P-*space* e estações de bicicletas compartilhadas
Fonte: Elaboração Própria

Para geração do P-*space* Aumentado foram ligados os pontos de ônibus às estações de bicicletas que se encontravam a uma distância menor ou igual a λr_1. E também foram conectadas entre si as estações de bicicletas localizadas a uma distância maior que λR_1 e menor ou igual a λR_2. A distância caminhada pelo pedestre entre o ponto de ônibus e a estação de bicicleta (e vice-versa) é chamada de r e a distância percorrida de bicicleta entre duas estações é denominada R, como pode ser observado na Figura 21. Os parâmetros λr_1, λR_1 e λR_2 são associados às variáveis r e R.

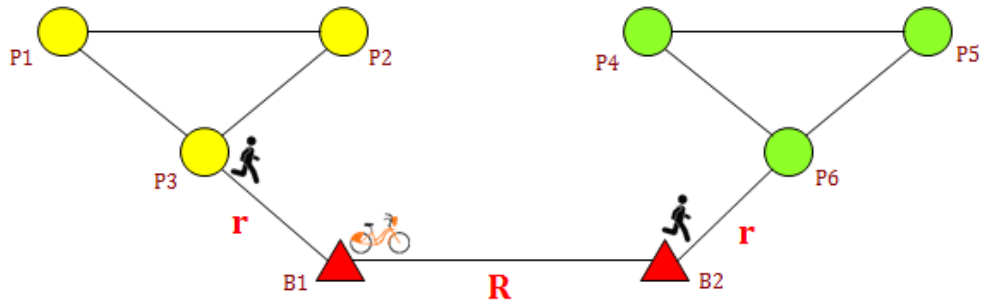


Figura 21 - Integração do P-*space* com as estações de bicicletas compartilhadas
Fonte: Elaboração Própria

Por fim, quando respeitados os requisitos de distância citados no parágrafo anterior, os pontos de ônibus conectados por meio das estações de bicicletas são ligados

entre si, formando assim o P-*space* Aumentado, conforme apresentado na Figura 22. Dessa forma, passa a ser possível transitar de um ponto em amarelo para um ponto em verde a partir da utilização das bicicletas compartilhadas como alimentadoras dos ônibus, tornando esta rede, originalmente desconexa, em uma rede conexa.



Figura 22 - P-*space* Aumentado
Fonte: Elaboração Própria

Para obter o P-*space* Aumentado neste estudo foram criadas duas matrizes (M1 e M2). A matriz M1 apresenta as distâncias entre os pontos de ônibus e as estações de bicicletas e a matriz M2 mostra as distâncias entre as estações de bicicletas.

Nessas matrizes foram filtradas as distâncias que respeitavam as restrições estabelecidas, segundo os parâmetros definidos para geração da rede (λr_1, λR_1 *e* λR_2). Neste estudo, os parâmetros λr_1, λR_1 e λR_2 equivalem a 500 m, 1000 m e 5000 m, respectivamente, assim foram estabelecidas como restrições $r \leq 500$ m e $1000 \text{ m} < R \leq 5000$ m, tendo em vista que segundo Lin e Yang (2011), as estações de bicicletas não devem estar localizadas a mais de 500 m dos pontos de origem e destino, e de acordo com Moritz (1997), aproximadamente 50% de todas as viagens realizadas de bicicleta são de 5000 m ou menos.

A partir dessa classificação são ligados na rede por meio de uma aresta os pontos de ônibus que respeitam a restrição de $r \leq 500$ m e que podem ser interligados por estações de bicicletas que respeitam a restrição de $1000 \text{ m} < R \leq 5000$ m. Dessa forma, é gerado o P-*space* Aumentado.

6.2. P-*space* Pedestres

Além do P-*space* e P-*space* Aumentado também foram elaborados neste estudo o P-*space* Pedestres e P-*space* Aumentado Pedestres. O diferencial dessas redes é que, além de serem conectados os pontos que compartilham pelo menos uma linha de ônibus

(como ocorre no P-*space* e P-*space* Aumentado), também são ligados os pontos de ônibus localizados dentro de um raio de 400 m de distância entre si. Esta é a distância máxima, determinada neste estudo, a ser percorrida pelos pedestres em seu deslocamento entre pontos de ônibus, visto que muitas pessoas utilizam mais de uma linha de ônibus em suas viagens e, em alguns casos, a baldeação não é realizada no mesmo ponto de ônibus.

A distância máxima entre pontos de parada de 400 m está de acordo com o que é estipulado por Alterkawi (2006), que afirma que a distância média de caminhada entre pontos de ônibus varia de 300 a 400 m em áreas urbanas. Assim como García-Palomares *et al.* (2012) que também assumem o trajeto de 400 m como distância máxima que as pessoas estão dispostas a andar para acessar os pontos de ônibus.

Essas redes proporcionam uma representação mais realista do P-*space* e P-*space* Aumentado, pois consideram o deslocamento dos pedestres entre pontos. O modelo desenvolvido para geração dessas redes é ilustrado na Figura 23 que apresenta uma imagem de satélite do centro da cidade do Rio de Janeiro, na qual foi delimitado em vermelho um raio de 400 m a partir de um ponto de ônibus escolhido ao acaso (marcado em amarelo). Os demais pontos de ônibus, marcados em verde, são aqueles que se encontram dentro deste raio, ou seja, podem ser alcançados por um pedestre que tenha descido de seu ônibus no ponto marcado em amarelo.

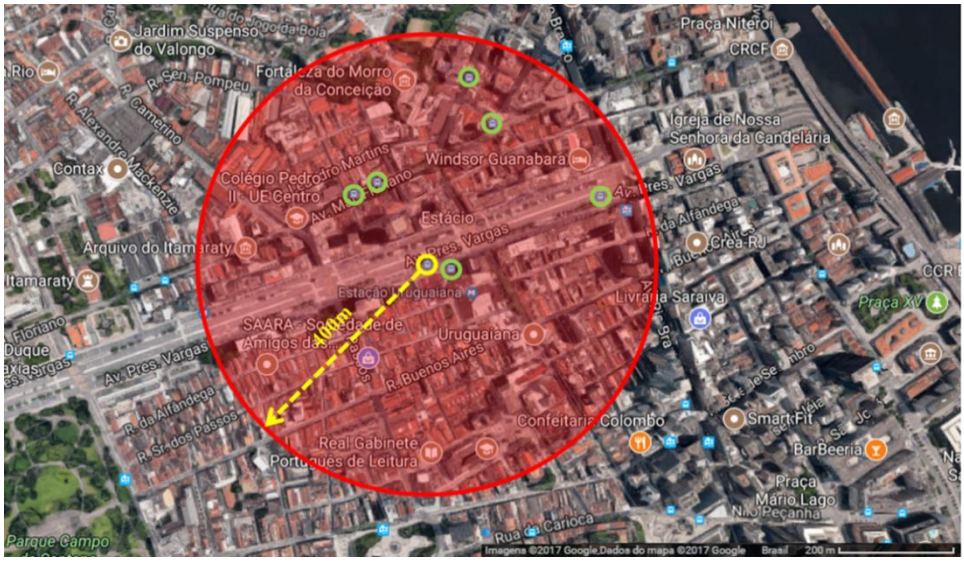


Figura 23 - Representação do P-*space* Pedestres
Fonte: Dados do *Google Maps* (2017)

Portanto, no caso da Figura 23, para gerar o P-*space* Pedestres além de ligar os pontos de ônibus que possuem linhas em comum, também seriam conectados ao ponto de ônibus marcado em amarelo os pontos de ônibus destacados em verde. E para geração do P-*space* Aumentado Pedestres também seriam ligados os pontos de ônibus que podem ser alcançados utilizando bicicletas compartilhadas.

Como a integração dos ônibus com os deslocamentos realizados a pé representa aproximadamente 67% das viagens com integrações entre diferentes meios de transporte (PMUS, 2015), torna-se evidente a importância dessas redes para este estudo.

6.3. P-*space* Limitado

Foi realizada uma delimitação da área de estudo para analisar de maneira mais significativa o impacto das bicicletas compartilhadas na rede de ônibus da cidade. Isso foi feito devido ao fato das estações de bicicletas do *Bike* Rio estarem concentradas em algumas regiões específicas da cidade do Rio de Janeiro, enquanto os pontos de ônibus estão dispersos por toda cidade. Na Figura 24 são ilustradas por meio de um mapa de calor as áreas com maior concentração de estações de bicicletas compartilhadas na cidade do Rio de Janeiro. Neste mapa as áreas com maior densidade de estações são coloridas em vermelho e as com menor densidade em verde.

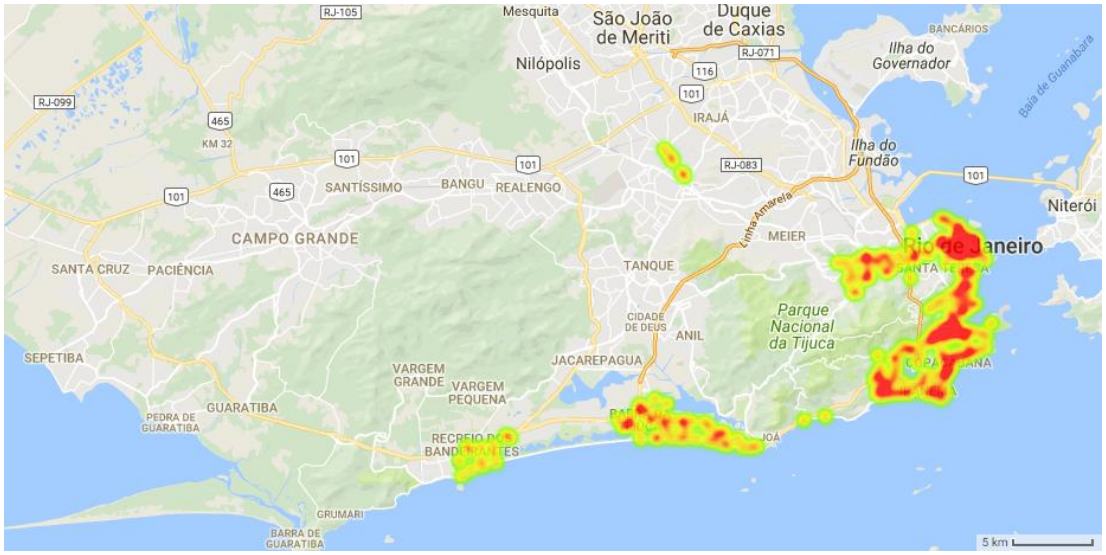


Figura 24 - Mapa de calor das estações do *Bike* Rio
Fonte: Dados cartográficos do *Google Fusion Tables* (2017)

A partir da Figura 24 é possível observar que a área que compreende a zona sul e o Centro da cidade do Rio de Janeiro é a região com maior concentração de estações de bicicletas do *Bike* Rio, seguida pela Barra da Tijuca. Por este motivo, na delimitação das regiões de interesse deste estudo foram destacadas duas áreas. A primeira engloba a Barra da Tijuca e Recreio dos Bandeirantes e a segunda compreende o Centro, zona sul da cidade do Rio de Janeiro e parte da Tijuca e Maracanã. Essas áreas demarcadas abrangem a maioria das estações do *Bike* Rio e são realçadas no mapa da Figura 25.

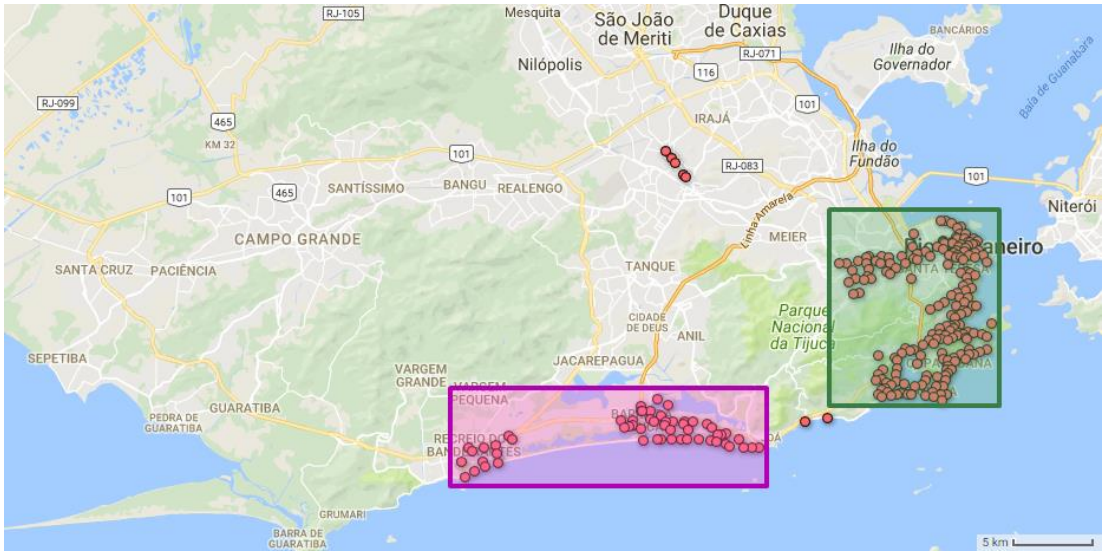


Figura 25 - Estações do *Bike* Rio localizadas nas áreas de interesse
Fonte: Dados cartográficos do *Google Fusion Tables* (2017)

Nas regiões destacadas na Figura 25 estão presentes 242 estações de bicicletas, que representam cerca de 97% de todas as estações do *Bike* Rio existentes na cidade do Rio de Janeiro, sendo 56 estações na área 1 (Barra/Recreio), em rosa, e 186 estações na área 2 (Centro/ Zona Sul), em verde. Foram desconsideradas as estações mais isoladas, localizadas em Madureira (5 estações) e São Conrado (2 estações), visto que não interagem com a maioria das estações por estarem muito distantes.

As regiões de interesse destacadas na Figura 25 foram delimitadas a partir das coordenadas das estações de bicicletas localizadas nos extremos das áreas destacadas. Sendo assim, foram selecionadas para a área 1 (Barra/Recreio) as estações com longitude entre -43.378368 e -43.29797 e latitude entre -23.014891 e -22.988811. E para a área 2 (Centro/ Zona Sul) as estações que possuem longitude entre -43.251329 e -43.162495 e latitude entre -22.989112 e -22.893227.

No mapa da Figura 26 são apresentados os pontos de ônibus situados nas duas áreas destacadas na Figura 25. Com base nos dados referentes ao ano de 2016, foram identificados 1300 pontos de ônibus nas regiões demarcadas, sendo 217 na área 1 (Barra/Recreio), em rosa, e 1083 na área 2 (Centro/Zona Sul), em verde. Portanto, nestas áreas estão presentes cerca de 20% do total de pontos de ônibus existentes na cidade do Rio de Janeiro no ano de 2016.

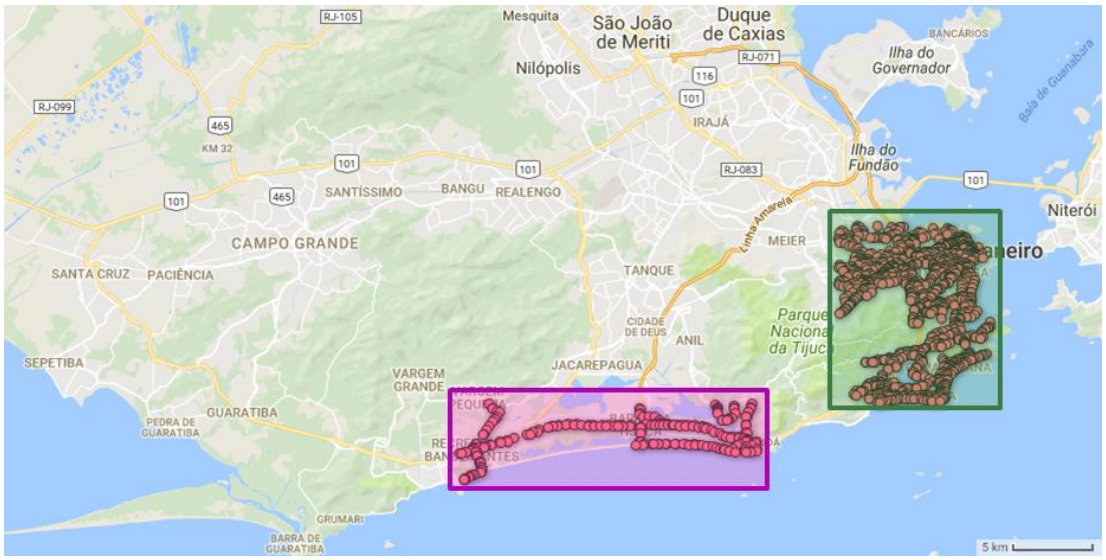


Figura 26 - Pontos de ônibus localizados nas áreas de interesse
Fonte: Dados cartográficos do *Google Fusion Tables* (2017)

Após a demarcação das regiões de interesse, foram geradas as redes *P-space* Limitado, *P-space* Aumentado Limitado, P-*space* Limitado Pedestres e P-*space* Aumentado Limitado Pedestres, de acordo com os pontos de ônibus e estações de bicicletas presentes nas áreas demarcadas.

7. Análise dos Resultados

Analisar a integração das bicicletas compartilhadas com os demais meios de transporte público disponíveis na cidade, principalmente com o ônibus (transporte público mais utilizado no município do Rio de Janeiro), pode evidenciar a importância dos programas de *bikesharing* para a mobilidade urbana da cidade. Tendo em vista que as bicicletas compartilhadas facilitam os deslocamentos pelos centros urbanos.

Dessa forma, visando estudar esta integração das bicicletas do *Bike* Rio com a rede de transporte por ônibus da cidade do Rio de Janeiro foram geradas neste estudo oito redes, sendo quatro completas com todos os pontos da cidade (P-*space*, P-*space* Aumentado, P-*space* Pedestres, P-*space* Aumentado Pedestres) e quatro limitadas com apenas os pontos das áreas demarcadas (P-*space* Limitado, P-*space* Aumentado Limitado, P-*space* Limitado Pedestres e P-*space* Aumentado Limitado Pedestres).

Em janeiro de 2017, quando foram coletados os dados das bicicletas compartilhadas, existiam 249 estações de bicicletas do *Bike* Rio distribuídas entre a zona sul da cidade, Centro, Tijuca, Maracanã, Madureira, Barra da Tijuca e Recreio dos Bandeirantes. Com maior concentração no Centro e na zona sul. Como pode ser verificado na Figura 27, que apresenta a localização das estações do *Bike* Rio no mapa da cidade do Rio de Janeiro.

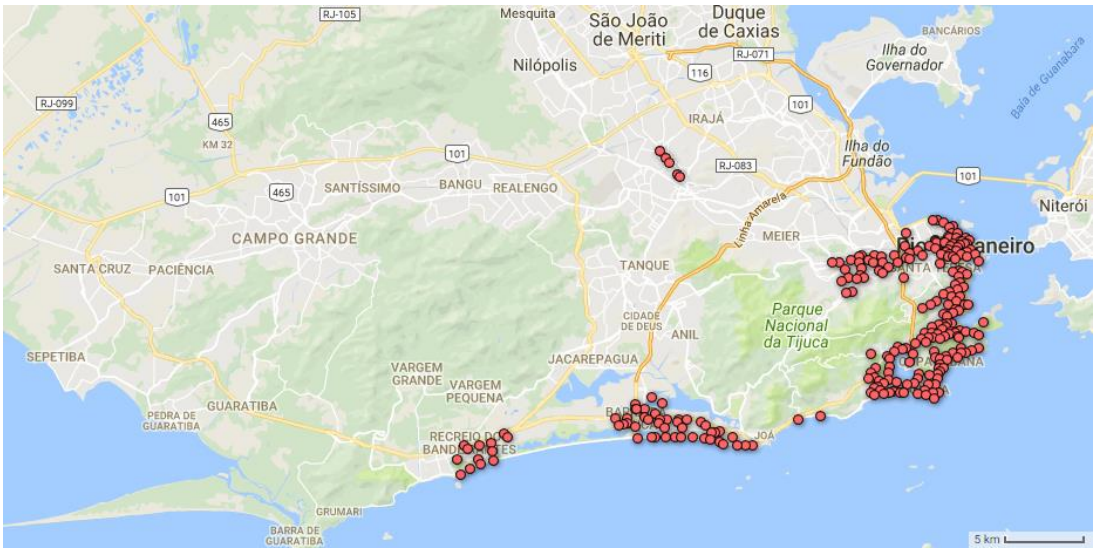


Figura 27 - Disposição das estações do *Bike* Rio em 2017
Fonte: Dados cartográficos do *Google Fusion Tables* (2017)

Quanto aos pontos de ônibus, existiam 6656 pontos na cidade do Rio de Janeiro em 2016, quando esses dados foram atualizados pela última vez. Essa informação pode ser observada no mapa da Figura 28 que mostra a localização dos pontos de ônibus na cidade do Rio de Janeiro.

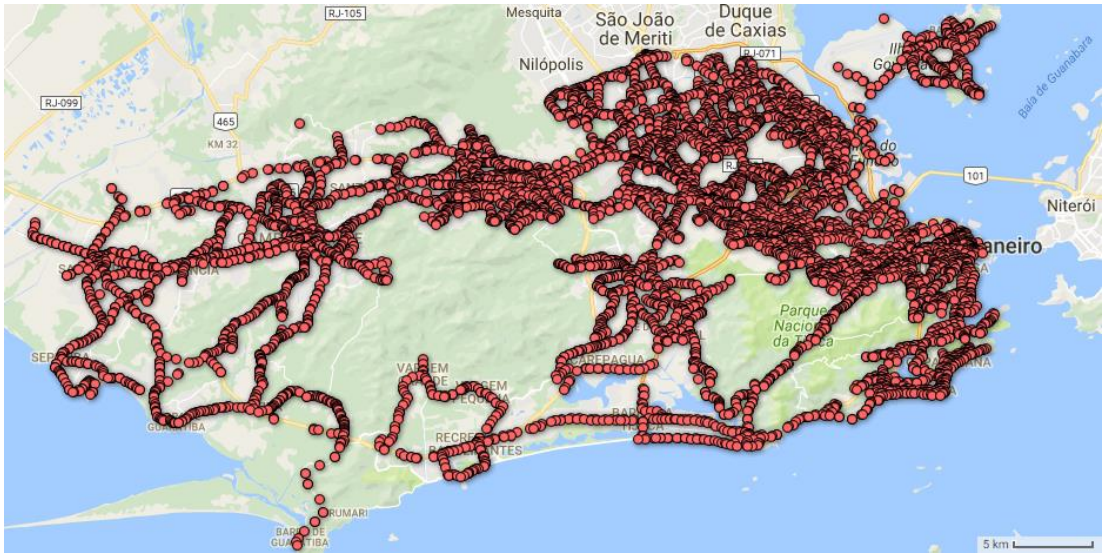


Figura 28 - Pontos de ônibus no Rio de Janeiro em 2016
Fonte: Dados cartográficos do *Google Fusion Tables* (2017)

Neste capítulo é realizada a análise dos resultados obtidos. Para isso, são analisadas e comparadas as principais propriedades das redes geradas neste estudo. As propriedades obtidas foram: número de arestas e vértices, grau médio, distância média, diâmetro, densidade e medidas de centralidade (grau, intermediação e proximidade).

7.1. P-*space* Aumentado

Na Tabela 5 são exibidos os valores das propriedades obtidas das redes P-*space* e P-*space* Aumentado (que integra as bicicletas compartilhadas à rede de ônibus da cidade do Rio de Janeiro), sendo esta última, gerada de acordo com as restrições $r \leq 500$ m e $1000 \text{ m} < R \leq 5000$ m, nas quais R equivale à distância percorrida de bicicleta entre suas estações e r representa a distância caminhada entre o ponto de ônibus e a estação de bicicleta, e vice-versa. As propriedades apresentadas nesta tabela são número de vértices e arestas, densidade, grau médio, distância média e diâmetro.

Tabela 5 - Propriedades do P-*space* e P-*space* Aumentado

Propriedades da Rede	***P-space***	***P-space* Aumentado**
Número de vértices	6656	6656
Número de arestas	1537649	1705762
Densidade	0,07	0,08
Grau Médio	462,03	512,55
Distância Média	2,22	2,19
Diâmetro	4	4

Fonte: Elaboração Própria

É possível observar na Tabela 5 que no P-*space* Aumentado o número de arestas aumenta consideravelmente quando comparado com o P-*space*, o que justifica o crescimento da densidade, visto que o número de vértices permanece o mesmo (ambas as redes possuem 6656 pontos de ônibus). Como a rede do P-*space* Aumentado é mais densa que a do P-*space*, existem mais possibilidades de deslocamentos entre os pontos de parada utilizando somente uma linha de ônibus, ou seja, sem realizar baldeação. Ambas as redes são consideradas densas, pois conectam todos os pontos de parada de cada uma das linhas de ônibus, possuindo assim, muitas arestas.

O grau médio foi outra propriedade que também aumentou no P-*space* Aumentado, tendo um crescimento em torno de 11% quando comparado com P-*space.* O grau médio indica que, a partir de um determinado ponto de ônibus no P-*space* Aumentado é possível alcançar, em média, cerca de 513 pontos na cidade do Rio de Janeiro, enquanto no P-*space* este número é de 462, aproximadamente.

Ainda na Tabela 5 nota-se que o único valor que permanece constante nas duas redes é o diâmetro, que é igual a 4, o que significa que para se deslocar de um ponto de ônibus para qualquer outro ponto seria necessário utilizar no máximo 4 linhas de ônibus. A distância média teve uma redução muito pequena do P-*space* para o P-*space* Aumentado, sendo cerca de 2 nas duas redes, ou seja, com 2 linhas de ônibus, em média, é possível trafegar entre a maioria dos pontos da cidade do Rio de Janeiro.

Também foi realizada a comparação da distribuição de distâncias do P-*space* com a do P-*space* Aumentado, apresentada na Figura 29, na qual é possível observar que a distribuição de distâncias é muito similar em ambos os casos, porém no P-*space* Aumentado há uma maior incidência, ainda que irrisória, da distância igual a 1 e 2. Isso significa que com a integração das bicicletas na rede de ônibus da cidade existe uma

tendência de redução da quantidade de linhas de ônibus necessárias para se deslocar entre os pontos de ônibus, ou seja, ocorre uma diminuição do número de baldeações necessárias para realizar uma viagem de um ponto a outro qualquer da cidade.

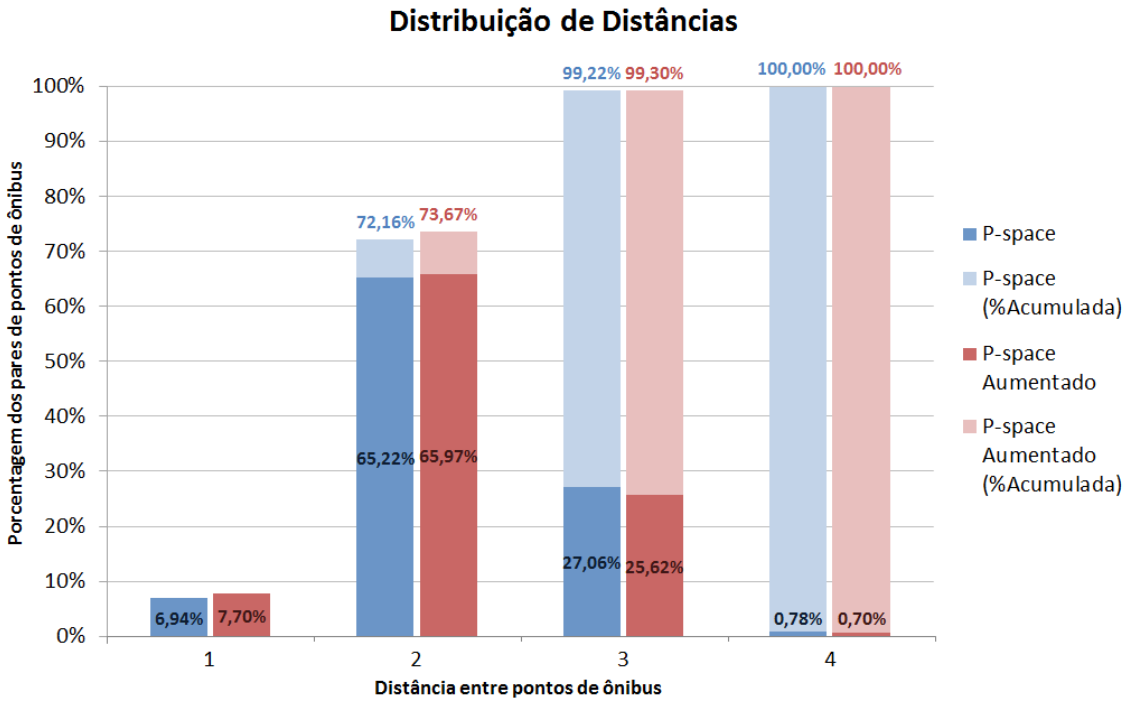


Figura 29 - Distribuição de Distâncias do P-*space* e P-*space* Aumentado
Fonte: Elaboração Própria

Na Figura 29 pode-se notar que em ambas as redes geradas ocorre com maior frequência a distância igual a 2, o que significa que no P-*space* com 2 linhas de ônibus é possível alcançar cerca de 65% dos pontos de ônibus da cidade e com até 2 linhas pode-se atingir, aproximadamente, 72% dos pontos. No caso do P-*space* Aumentado esse número sobe para 66% e 74%, respectivamente, sendo assim, um fator indicativo da importância das bicicletas compartilhadas para o aumento da integração da cidade, reduzindo a necessidade de baldeação para se deslocar pelos pontos de ônibus. Mais de 99% dos pontos de ônibus podem ser alcançados utilizando até 3 linhas de ônibus e com até 4 linhas é possível alcançar todos os pontos de ônibus da cidade.

Quanto à centralização das redes, medida que indica o nível de centralização da rede a partir da variação do valor da centralidade de seus vértices, foram obtidos os valores da centralização de grau, de proximidade e de intermediação das redes P-*space* e P-*space* Aumentado, indicados na Tabela 6.

Tabela 6 - Centralização do P-*space* e P-*space* Aumentado

Centralização da rede	*P-space*	*P-space* Aumentado
Grau	0,3729	0,4070
Proximidade	0,3614	0,3899
Intermediação	0,0225	0,0230

Fonte: Elaboração Própria

O P-*space* Aumentado é mais centralizado que o P-*space* em todas as medidas de centralização analisadas (grau, proximidade e intermediação), ainda que com uma diferença pequena. Isso significa que no P-*space* Aumentado há maior variação dos valores da centralidade de seus pontos de ônibus do que no P-*space*.

Também foram obtidas neste estudo as medidas de centralidade de grau, de proximidade e de intermediação dos pontos do P-*space* e do P-*space* Aumentado. Na Figura 30 são apresentados os valores da centralidade de grau dos pontos do P-*space* e do P-*space* Aumentado divididos em seis intervalos iguais, sendo indicada a quantidade de pontos de ônibus em cada uma das seis faixas de valores desta centralidade.

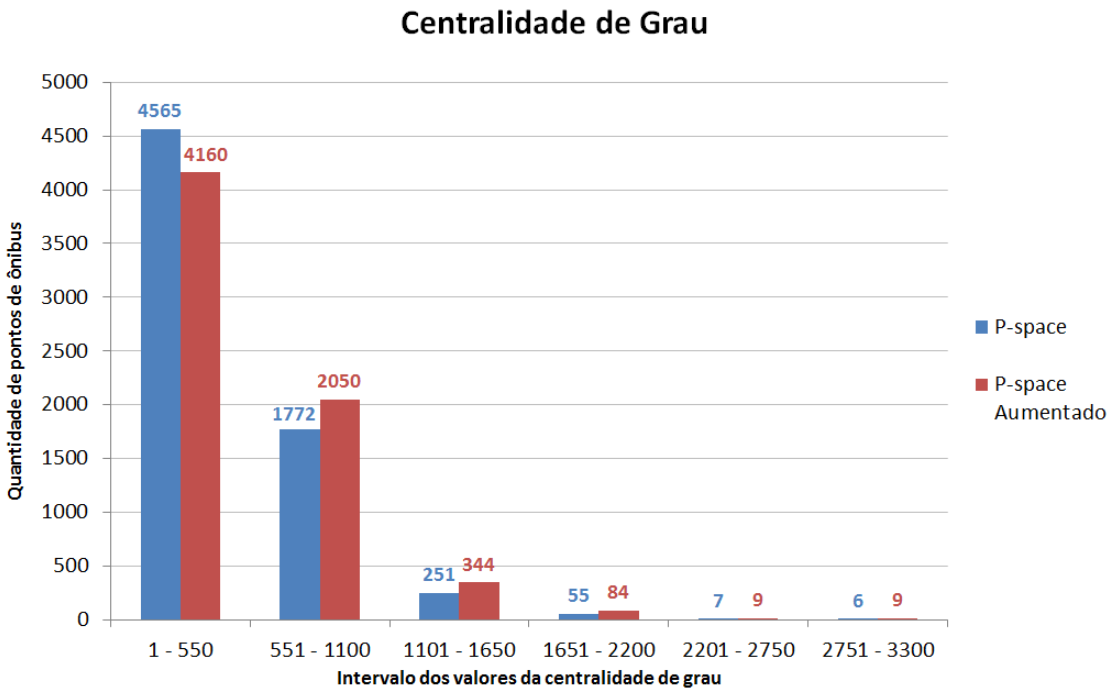


Figura 30 - Centralidade de Grau do P-*space* e P-*space* Aumentado
Fonte: Elaboração Própria

Na Figura 30 é verificado que a maioria dos pontos de ônibus das redes P-*space* e P-*space* Aumentado possuem grau no intervalo de 1 a 550. Em ambas as redes menos

de 7% do total de pontos possuem grau superior a 1101, sendo assim, são poucos os pontos de ônibus a partir dos quais é possível alcançar mais de 1100 pontos da cidade. No P-*space* somente 6 pontos de ônibus possuem grau entre 2751 e 3300, que é o intervalo com maior grau. Isso significa que a partir de cada um desses 6 pontos é possível se deslocar para mais de 2750 pontos da cidade usando apenas uma linha de ônibus, ou seja, cada um desses pontos podem alcançar mais de 41% de todos os pontos de ônibus da cidade do Rio de Janeiro. No P-*space* Aumentado o número de pontos com grau neste mesmo intervalo sobe para 9.

Os valores da centralidade de proximidade dos pontos de ônibus do P-*space* e do P-*space* Aumentado são exibidos na Figura 31, divididos em seis intervalos iguais começando em 0,33 (menor valor de centralidade de proximidade das duas redes).

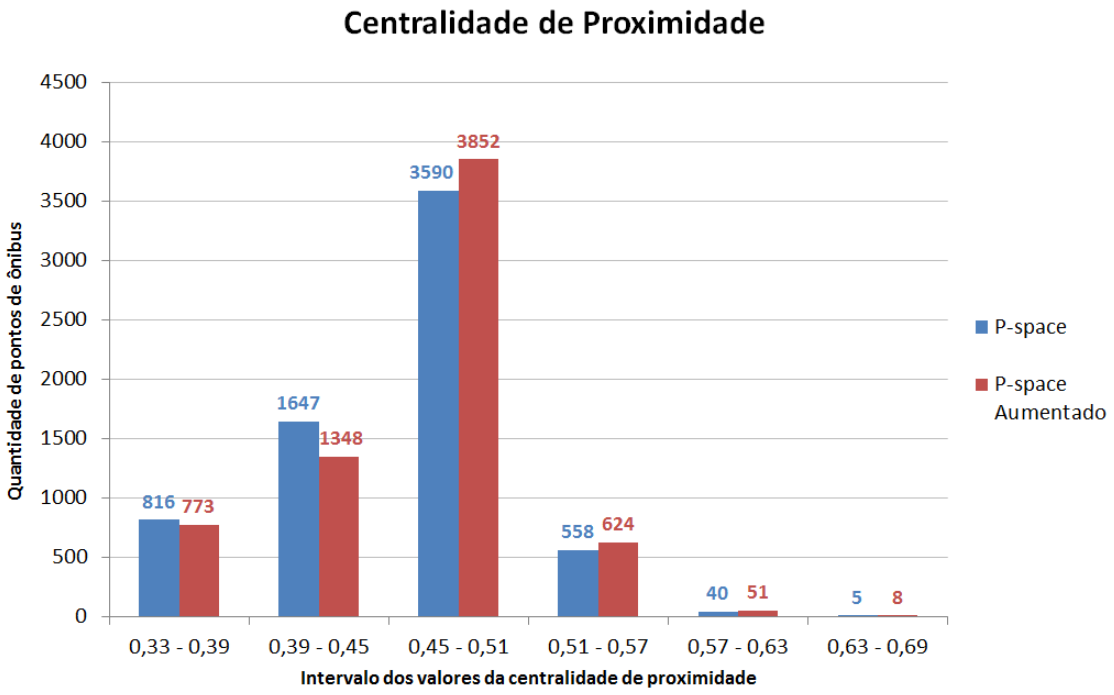


Figura 31 - Centralidade de Proximidade do P-*space* e P-*space* Aumentado
Fonte: Elaboração Própria

Pode-se observar na Figura 31 que a maioria dos pontos das duas redes possui valor de centralidade de proximidade entre 0,45 e 0,51. Nos dois primeiros intervalos dos valores da centralidade de proximidade a quantidade de pontos do P-*space* é superior ao do P-*space* Aumentado, porém a partir do terceiro intervalo esta situação se inverte, o que indica que no P-*space* Aumentado existe uma maior quantidade de pontos

de ônibus com valor de centralidade de proximidade elevado do que no P-*space*. No intervalo com maior centralidade de proximidade (que varia de 0,63 a 0,69) o número de pontos de ônibus aumentou de 5 no P-*space* para 8 no P-*space* Aumentado. Esses pontos com altos valores de centralidade de proximidade possuem distância menor em relação aos demais, tendendo assim, a serem alcançados utilizando poucas linhas de ônibus, ou seja, sem a necessidade de realizar muitas baldeações.

Na Figura 32 é indicada a quantidade de pontos de ônibus em cada intervalo dos valores da centralidade de intermediação nas redes P-*space* e P-*space* Aumentado. Esses valores são divididos em seis intervalos, com início no zero, que foi o menor valor de centralidade de intermediação em ambas as redes. Nota-se que a distribuição dos pontos de ônibus pelos intervalos nas duas redes é muito semelhante.

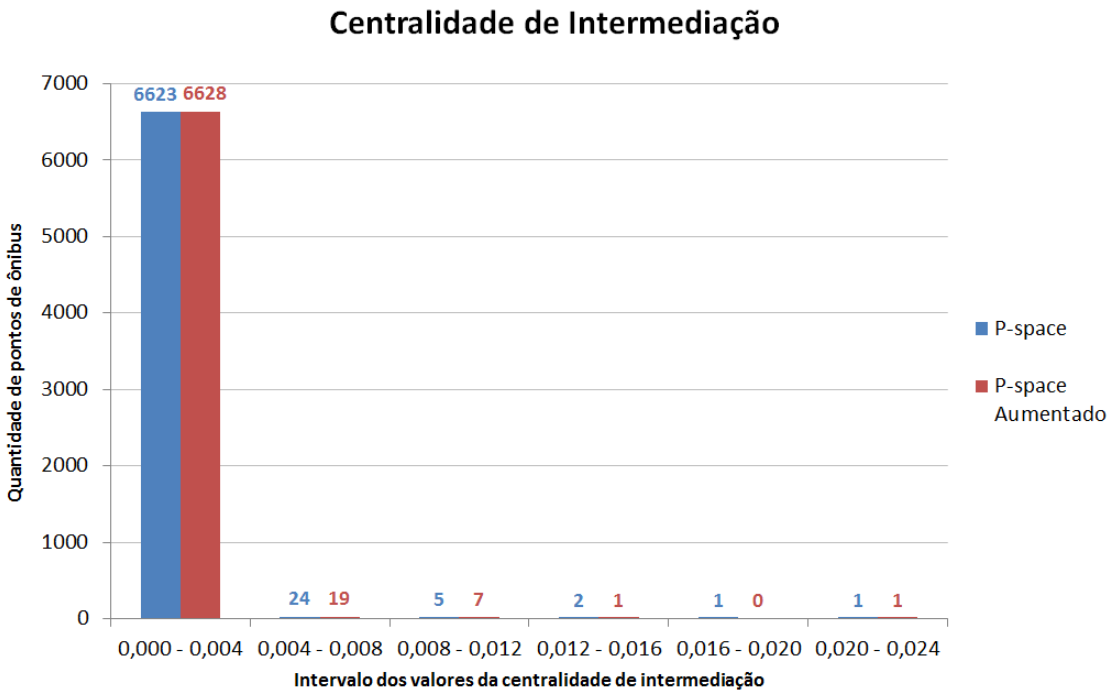


Figura 32 - Centralidade de Intermediação do P-*space* e P-*space* Aumentado
Fonte: Elaboração Própria

O P-*space* e P-*space* Aumentado são redes densas, possuindo assim, muitas arestas e com isso muitos caminhos mínimos entre os pontos de ônibus, o que torna o valor da centralidade de intermediação dos pontos dessas redes baixo. Mais de 99% de todos os pontos de ônibus dessas duas redes têm centralidade de intermediação na menor faixa de intervalo, que varia de 0 a 0,004. Sendo que no P-*space* a quantidade de

pontos de ônibus neste intervalo é de 6623, enquanto no P-*space* Aumentado é de 6628. Cada uma dessas redes possui apenas 1 ponto no intervalo com maiores valores de centralidade de intermediação que varia de 0,020 e 0,024.

Além das medidas de centralidade, também foi analisada neste estudo a alteração do grau médio do P-*space* Aumentado, de acordo com a variação da distância percorrida de bicicleta entre suas estações (R) e a pé entre os pontos de ônibus e estações de bicicletas (r). Para isso, foram criadas 25 redes do P-*space* Aumentado, variando os parâmetros λR de 1000 m a 5000 m em intervalos de 1000 m e λr de 100 m a 500 m em intervalos de 100 m, segundo as restrições $R \leq \lambda R$ e $r \leq \lambda r$. Conforme pode ser observado na Figura 33.

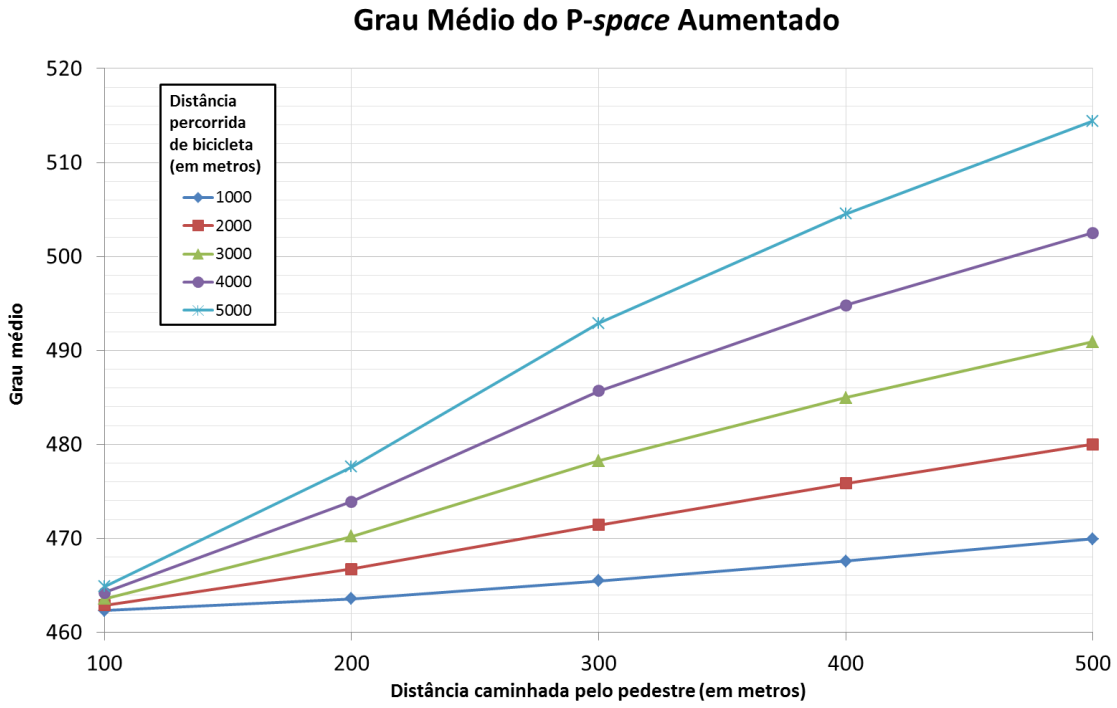


Figura 33 - Variação do grau médio do P-*space* Aumentado
Fonte: Elaboração Própria

A Figura 33 mostra que o grau médio cresce conforme aumenta a distância percorrida de bicicleta entre suas estações (R) e caminhada pelo pedestre do ponto de ônibus à estação de bicicleta (r). Porém, ocorre uma redução deste crescimento do grau médio para as redes criadas com λr maior que 300 m, exceto para as redes construídas com λR igual a 1000 m. Esta variação do grau médio também pode ser observada na Tabela 7 que gerou o gráfico da Figura 33. Nota-se que o grau médio varia de

aproximadamente 462 (quando *R* e *r* são menores ou iguais a 1000 m e 100 m, respectivamente) a 514 (quando *R* e *r* são menores ou iguais a 5000 m e 500 m, respectivamente).

Tabela 7 - Grau Médio do P-*space* Aumentado

Grau Médio					
λr / λR	**100**	**200**	**300**	**400**	**500**
1000	462,30	463,57	465,47	467,58	469,93
2000	462,89	466,73	471,44	475,86	480,00
3000	463,56	470,22	478,24	484,95	490,93
4000	464,22	473,92	485,70	494,80	502,51
5000	464,87	477,59	492,90	504,54	514,43

Fonte: Elaboração Própria

Além do grau médio, também foram analisadas outras propriedades dessas 25 redes geradas do P-*space* Aumentado. Uma dessas propriedades foi a distância média entre vértices indicada na Tabela 8. Foi verificado que conforme cresce a distância percorrida de bicicleta entre suas estações e a pé dos pontos de ônibus a estações de bicicletas (e vice-versa), ocorre uma pequena redução da distância média entre os pontos, de 2,216 para 2,193 (segundo o valor mínimo e máximo, respectivamente, dos parâmetros λr e λR indicados na Tabela 8). Sendo assim, nas 25 redes geradas a distância média entre pontos é igual a aproximadamente 2, isso significa que em média são necessárias 2 linhas de ônibus para ir de um ponto a outro qualquer da cidade.

Tabela 8 - Distância Média do P-*space* Aumentado

Distância Média					
λr / λR	**100**	**200**	**300**	**400**	**500**
1000	2,216	2,215	2,214	2,212	2,210
2000	2,216	2,213	2,211	2,208	2,205
3000	2,215	2,212	2,209	2,205	2,202
4000	2,215	2,210	2,206	2,202	2,198
5000	2,214	2,208	2,203	2,198	2,193

Fonte: Elaboração Própria

O diâmetro, maior distância entre qualquer par de vértices da rede, é igual a 4 em todas as 25 redes do P-*space* Aumentado, ou seja, com até 4 linhas de ônibus é possível se deslocar de um ponto para outro qualquer da cidade do Rio de Janeiro.

Outra propriedade analisada nas 25 redes geradas do P-*space* Aumentado foi a densidade, apresentada na Tabela 9. Constatou-se que as redes tornaram-se mais densas com o aumento da distância percorrida de bicicleta entre suas estações e a pé entre pontos de ônibus e estações de bicicletas, variando suas densidades de 0,0695 a 0,0773 que representa um aumento em torno de 11%. Dessa forma, passa a existir uma maior quantidade de deslocamentos possíveis entre pontos de ônibus utilizando apenas uma linha de ônibus, ou seja, sem a necessidade de realizar baldeação.

Tabela 9 - Densidade do P-*space* Aumentado

Densidade					
λr / λR	**100**	**200**	**300**	**400**	**500**
1000	0,0695	0,0697	0,0699	0,0703	0,0706
2000	0,0696	0,0701	0,0708	0,0715	0,0721
3000	0,0697	0,0707	0,0719	0,0729	0,0738
4000	0,0698	0,0712	0,0730	0,0743	0,0755
5000	0,0699	0,0718	0,0741	0,0758	0,0773

Fonte: Elaboração Própria

Também foi obtido o número de arestas de cada uma das 25 redes do P-*space* Aumentado indicado na Tabela 10, que foi utilizada para gerar o gráfico da Figura 34, que ilustra melhor a variação do número de arestas segundo as distâncias percorridas de bicicleta e a pé. Como pode ser observado na Figura 34, à medida que essas distâncias aumentam cresce o número de arestas da rede, tornando-a mais densa e aumentando assim, a quantidade de deslocamentos possíveis entre os pontos utilizando apenas uma linha de ônibus.

Quando a distância caminhada pelo pedestre é de no máximo 100 m, a diferença entre a quantidade de arestas das redes geradas, variando a distância percorrida de bicicleta de 1000 m a 5000 m, é pequena. Dessa forma, para haver um aumento considerável do número de arestas é necessário aumentar a distância máxima caminhada pelo pedestre entre os pontos de ônibus e as estações de bicicletas.

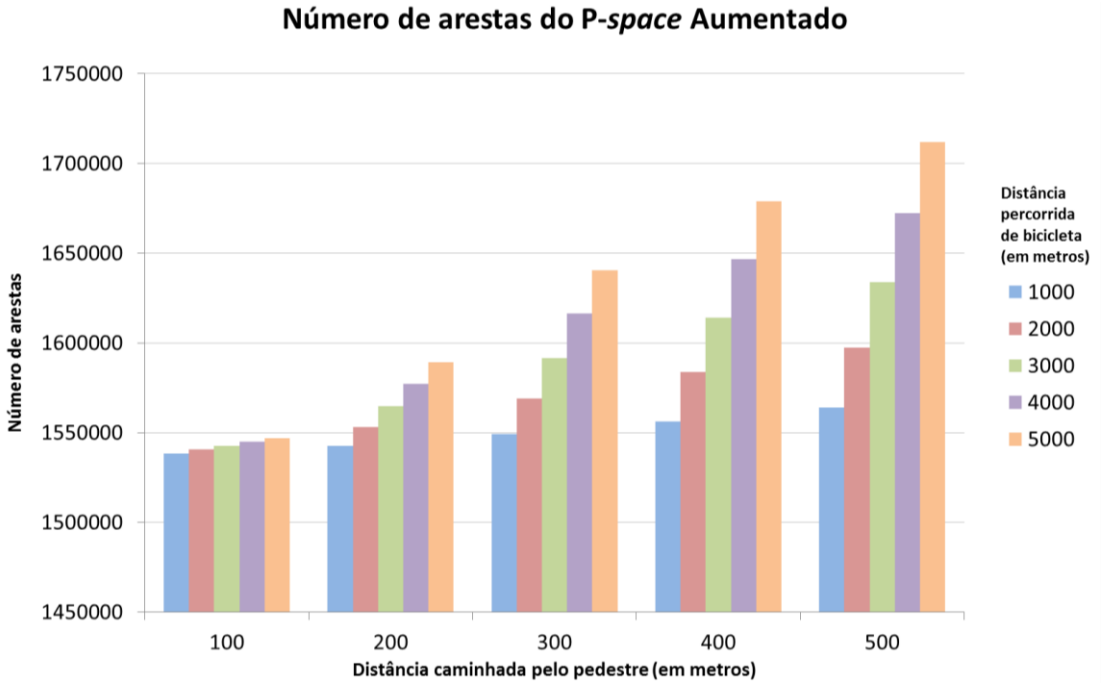


Figura 34 - Variação do número de arestas do P-*space* Aumentado
Fonte: Elaboração Própria

Pode-se notar na Tabela 10 que das 25 redes geradas do P-*space* Aumentado a que possui a maior quantidade de arestas foi desenvolvida com os parâmetros λr e λR iguais a 500 m e 5000 m, respectivamente. Esta rede possui 1712011 arestas, que representam a quantidade de deslocamentos possíveis entre os pontos de ônibus da cidade do Rio de Janeiro utilizando somente uma linha de ônibus. Este valor é cerca de 11% maior que o número de arestas verificado na rede construída com os parâmetros λr e λR iguais a 100 m e 1000 m, respectivamente.

Tabela 10 - Número de Arestas do P-*space* Aumentado

Número de Arestas					
λR \ λr	**100**	**200**	**300**	**400**	**500**
1000	1538547	1542752	1549077	1556111	1563941
2000	1540500	1553263	1568938	1583676	1597431
3000	1542715	1564879	1591571	1613922	1633806
4000	1544919	1577198	1616408	1646684	1672349
5000	1547073	1589423	1640371	1679107	1712011

Fonte: Elaboração Própria

Dessa forma, analisando as redes do P-*space* e P-*space* Aumentado é constatado que a integração das bicicletas compartilhadas na rede de ônibus da cidade do Rio de Janeiro como alimentadoras dos ônibus facilita a locomoção da população ao tornar a rede mais coesa e tende a reduzir o número de linhas de ônibus necessárias para se deslocar pela cidade. No entanto, como ainda existem poucas estações de bicicletas compartilhadas na cidade e a maioria está concentrada em áreas específicas, os resultados encontrados nesta análise não são muito expressivos. Além disso, essas redes não consideram os deslocamentos realizados pelos pedestres entre pontos de ônibus.

7.2. P-*space* Aumentado Pedestres

O P-*space* Pedestres e o P-*space* Aumentado Pedestres foram desenvolvidos a fim de considerar os deslocamentos realizados a pé entre pontos de ônibus, tendo em vista que, para se deslocar de ônibus pela cidade do Rio de Janeiro muitas vezes é preciso trocar de linhas de ônibus, sendo necessário, em alguns casos, ir para outro ponto de ônibus para embarcar na linha desejada. Isso tende a ocorrer com mais frequência no BRS, que especifica as linhas de ônibus que podem parar em cada ponto.

A partir da análise dos valores indicados na Tabela 11 das propriedades obtidas das redes P-*space* Pedestres e P-*space* Aumentado Pedestres (criada segundo as restrições $r \leq 500$ m e 1000 m $< R \leq 5000$ m), pode-se concluir que a rede de ônibus da cidade do Rio de Janeiro se tornou mais conectada com a integração das bicicletas compartilhadas e ao considerar os deslocamentos de até 400 m realizados a pé entre os pontos de ônibus, tendo em vista que a densidade obteve um pequeno aumento, em torno de 11%, do P-*space* Pedestres para o P-*space* Aumentado Pedestres.

Tabela 11 - Propriedades do P-*space* Pedestres e P-*space* Aumentado Pedestres

Propriedades da Rede	***P-space* Pedestres**	***P-space* Aumentado Pedestres**
Número de vértices	6656	6656
Número de arestas	1545932	1713549
Densidade	0,07	0,08
Grau Médio	464,52	514,89
Distância Média	2,21	2,19
Diâmetro	4	4

Fonte: Elaboração Própria

Este aumento da densidade ocorre pelo acréscimo de arestas (deslocamentos usando apenas uma linha de ônibus) com a manutenção do número de vértices (pontos de ônibus). Também é possível observar na Tabela 11 que o grau médio aumentou cerca de 11% do P-*space* Pedestres para o P-*space* Aumentado Pedestres, existindo assim, mais opções de pontos de ônibus que se pode alcançar a partir de um ponto qualquer da cidade. A distância média teve uma pequena redução, mas seu valor aproximado permaneceu igual a 2 nas duas redes, o que significa que com 2 linhas de ônibus, em média, é possível se deslocar entre a maioria dos pontos da cidade. O diâmetro foi a única propriedade que se manteve constante nas duas redes, seu valor indica que com no máximo 4 linhas, pode-se ir de um ponto de ônibus para outro qualquer da cidade.

A distribuição de distâncias do P-*space* Pedestres e P-*space* Aumentado Pedestres são muito parecidas, como pode ser verificado na Figura 35. Ainda assim, no P-*space* Aumentado Pedestres a porcentagem de pares de pontos de ônibus com distância menor ou igual a 2 é um pouco superior a do P-*space* Pedestres, que possui um número maior de pares de pontos de ônibus com distância igual a 3. Em ambas as redes com até 3 linhas de ônibus é possível se deslocar entre aproximadamente 99% dos pontos de ônibus da cidade do Rio de Janeiro.

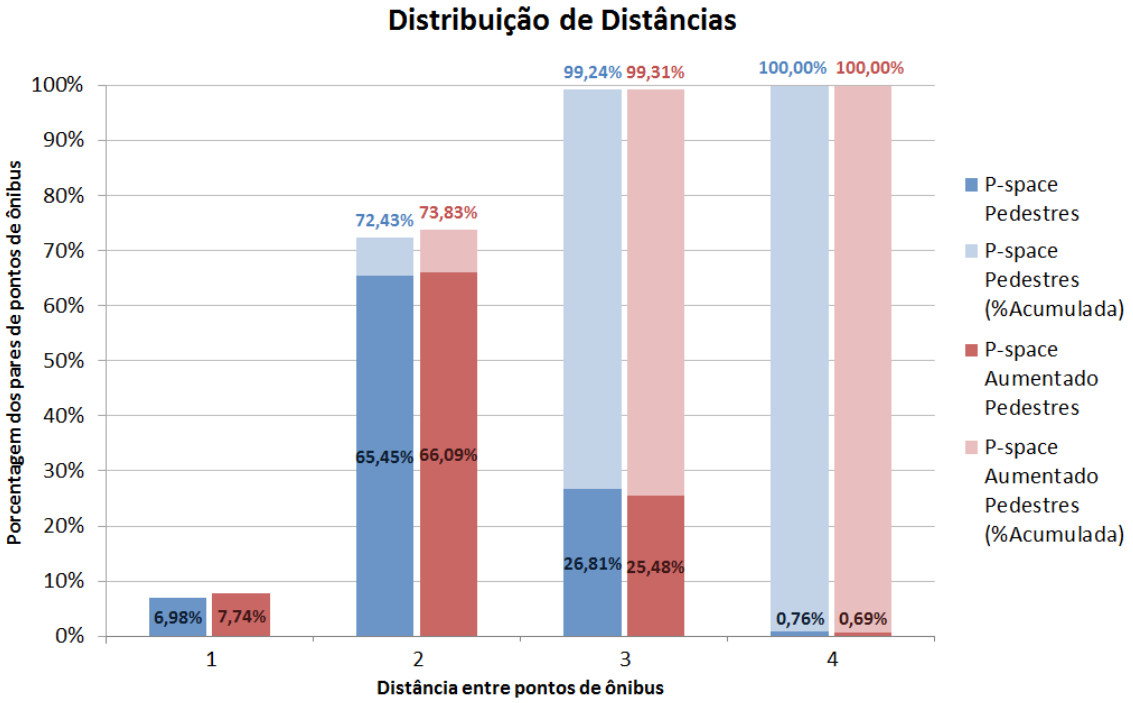


Figura 35 - Distribuição de Distâncias do P-*space* Pedestres e P-*space* Aumentado Pedestres
Fonte: Elaboração Própria

Ao analisar os valores de centralização das redes P-*space* Pedestres e P-*space* Aumentado Pedestres indicados na Tabela 12, nota-se que a diferença entre esses valores não é muito grande. Porém, como esses valores no P-*space* Aumentado Pedestres são superiores aos do P-*space* Pedestres em todas as medidas de centralização obtidas (grau, proximidade e intermediação), o P-*space* Aumentado Pedestres é considerado uma rede mais centralizada que o P-*space* Pedestres.

Tabela 12 - Centralização do P-*space* Pedestres e P-*space* Aumentado Pedestres

Centralização da rede	***P-space* Pedestres**	***P-space* Aumentado Pedestres**
Grau	0,3736	0,4077
Proximidade	0,3612	0,3901
Intermediação	0,0224	0,0230

Fonte: Elaboração Própria

Além disso, foram analisadas as centralidades de grau, de proximidade e de intermediação dos pontos de ônibus do P-*space* Pedestres e do P-*space* Aumentado Pedestres, dividindo os valores da centralidade em seis intervalos iguais, sendo indicado o número de pontos presentes em cada intervalo. Na Figura 36 são exibidos os valores da centralidade de grau do P-*space* Pedestres e P-*space* Aumentado Pedestres.

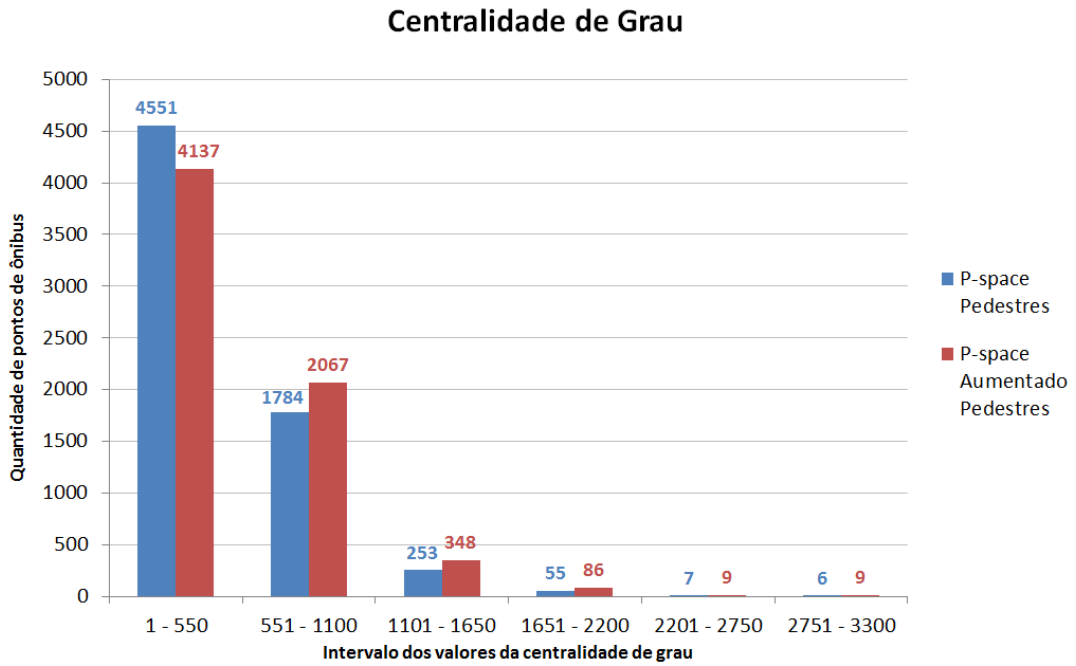


Figura 36 - Centralidade de Grau do P-*space* Pedestres e P-*space* Aumentado Pedestres
Fonte: Elaboração Própria

Na centralidade de grau é verificada uma maior quantidade de pontos de ônibus no primeiro intervalo de 1 a 550, no qual o P-*space* Pedestres possui mais pontos que o P-*space* Aumentado Pedestres. Porém, a partir do segundo intervalo esta situação se inverte, de modo que, no último intervalo (de 2751 a 3300) apenas 6 pontos no P-*space* Pedestres podem alcançar mais de 2750 pontos, enquanto no P-*space* Aumentado Pedestres este número sobe para 9. Como pode ser observado na Figura 36.

Conforme exibido na Figura 37, o intervalo dos valores da centralidade de proximidade com maior quantidade de pontos de ônibus em ambas as redes varia de 0,45 a 0,51 possuindo 3618 pontos no P-*space* Pedestres e 3839 pontos no P-*space* Aumentado Pedestres, que continuou a possuir mais pontos nos intervalos subsequentes. No intervalo com maior centralidade de proximidade (de 0,63 a 0,69) o número de pontos aumentou de 5 no P-*space* Pedestres para 8 no P-*space* Aumentado Pedestres.

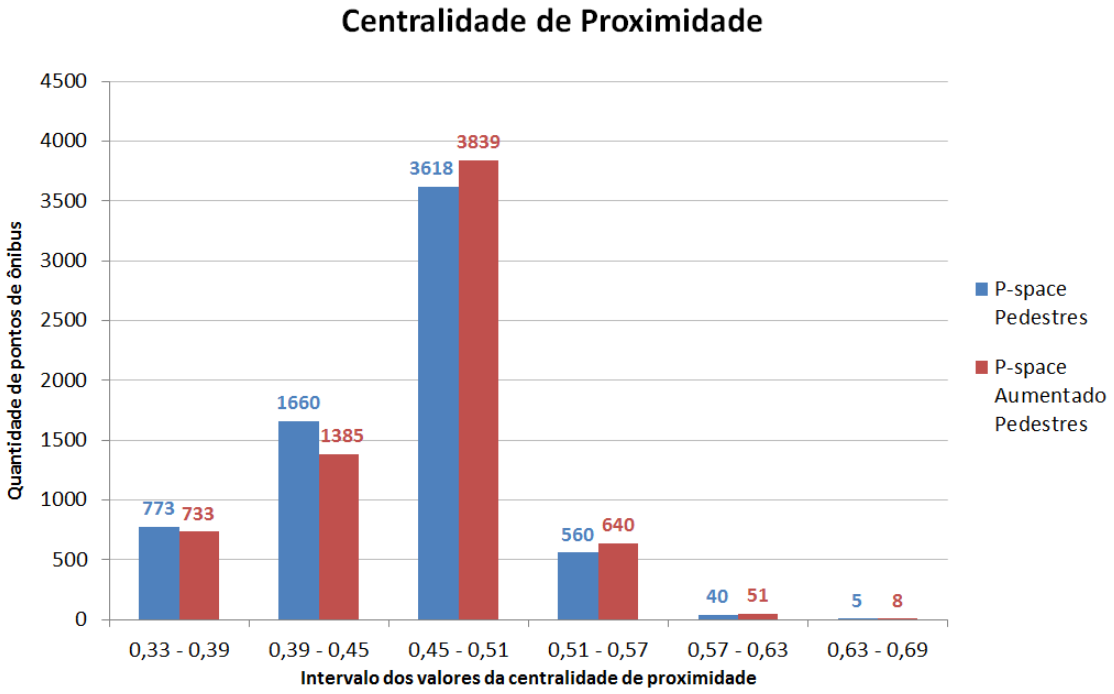


Figura 37 - Centralidade de Proximidade do P-*space* Pedestres e P-*space* Aumentado Pedestres
Fonte: Elaboração Própria

Na Figura 38 é indicada a quantidade de pontos de ônibus nos intervalos dos valores da centralidade de intermediação do P-*space* Pedestres e P-*space* Aumentado Pedestres. Neste caso, ambas as redes possuem um comportamento muito parecido, com a maioria dos pontos de ônibus presente no primeiro intervalo que varia de 0 a 0,005

possuindo 6623 pontos no P-*space* Pedestres e 6628 pontos no P-*space* Aumentado Pedestres, que representam mais de 99% do total de pontos de ônibus da cidade. Por outro lado, as duas redes possuem apenas 1 ponto no intervalo com maiores valores da centralidade de intermediação, que varia de 0,020 a 0,024.

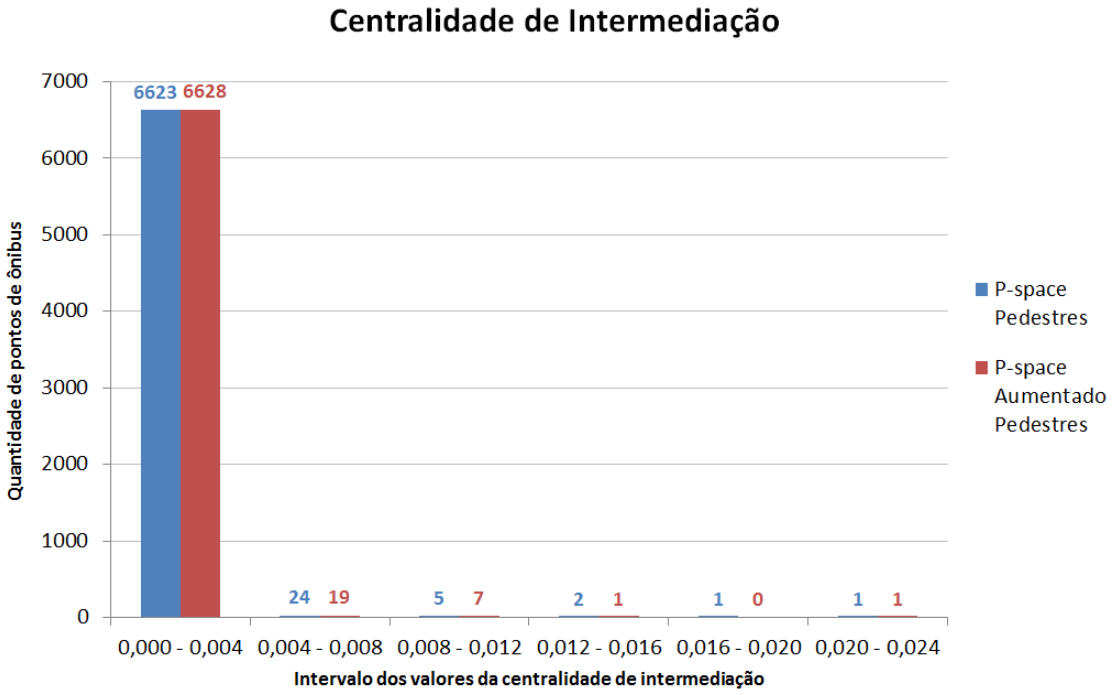


Figura 38 - Centralidade de Intermediação do P-*space* Pedestres e P-*space* Aumentado Pedestres
Fonte: Elaboração Própria

Além disso, também foram geradas 25 redes do P-*space* Aumentado Pedestres para analisar a alteração dos valores de suas propriedades (grau médio, distância média, diâmetro, densidade e número de arestas), de acordo com a variação dos parâmetros λR de 1000 m a 5000 m em intervalos de 1000 m e λr de 100 m a 500 m em intervalos de 100 m, respeitando as restrições $R \leq \lambda R$ e $r \leq \lambda r$.

Pode ser verificado na Figura 39 que o grau médio aumenta à medida que cresce a distância percorrida de bicicleta entre suas estações (R) e a pé entre pontos de ônibus e estações de bicicletas (r). Este crescimento é mais acentuado quando a distância máxima caminhada pelo pedestre do ponto de ônibus a estação de bicicleta (e vice-versa) aumenta de 200 m para 300 m.

A Figura 39 é gerada a partir da Tabela 13, na qual é exibido o valor do grau médio de todas as 25 redes geradas do P-*space* Aumentado Pedestres, sendo possível

comparar esses valores entre si. A partir desta comparação nota-se que entre o maior e o menor grau médio dessas redes (cerca de 516 e 465, respectivamente) não há uma diferença muito expressiva, ou seja, com o aumento de *r* e *R* o grau médio tem um crescimento de no máximo 11%.

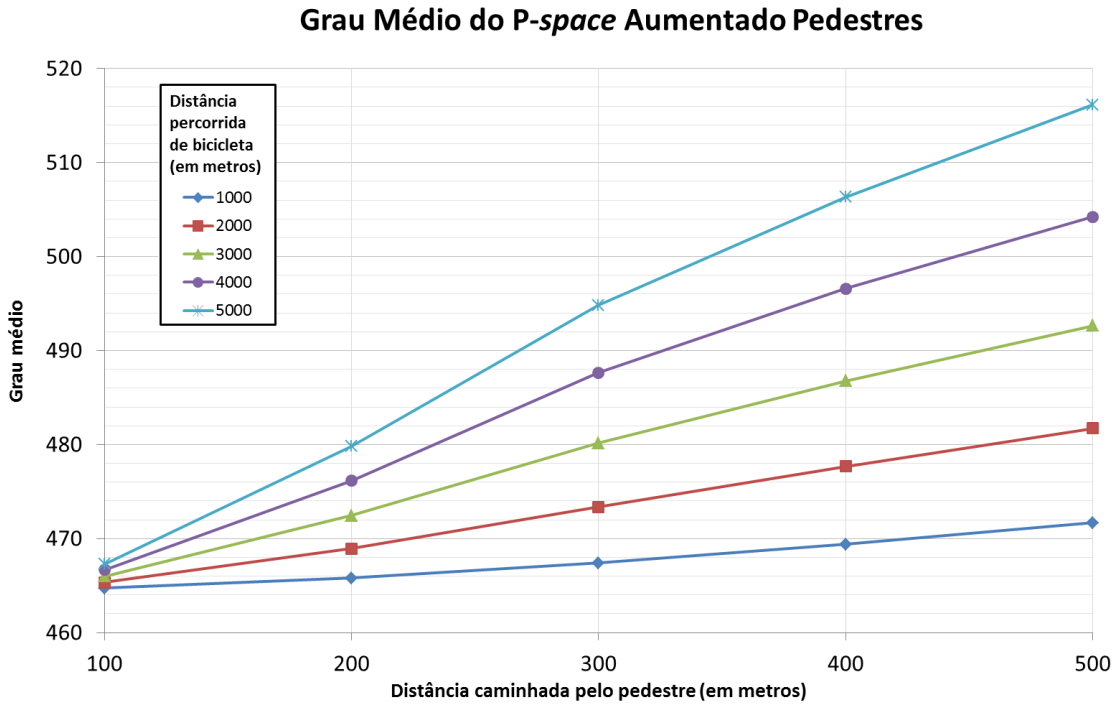


Figura 39 - Variação do grau médio do P-*space* Aumentado Pedestres
Fonte: Elaboração Própria

Tabela 13 - Grau Médio do P-*space* Aumentado Pedestres

Grau Médio					
λR \ λr	**100**	**200**	**300**	**400**	**500**
1000	464,75	465,78	467,41	469,39	471,66
2000	465,33	468,94	473,38	477,67	481,72
3000	466,00	472,43	480,18	486,76	492,65
4000	466,66	476,13	487,64	496,60	504,24
5000	467,31	479,81	494,84	506,34	516,15

Fonte: Elaboração Própria

Na Tabela 14 é apresentada a distância média entre os pontos de ônibus de cada uma das 25 redes do P-*space* Aumentado Pedestres. Com o aumento dos parâmetros λR e λr (associados à distância percorrida de bicicleta entre suas estações e a pé entre

pontos de ônibus e estações de bicicletas, respectivamente) ocorre uma redução muito pequena da distância média, de no máximo 1%, aproximadamente. Em todas as 25 redes geradas são necessárias, em média, 2 linhas de ônibus para se deslocar de um ponto de ônibus a outro ponto qualquer da cidade.

Tabela 14 - Distância Média do P-*space* Aumentado Pedestres

Distância Média					
λr / λR	**100**	**200**	**300**	**400**	**500**
1000	2,213	2,212	2,211	2,210	2,208
2000	2,213	2,211	2,209	2,206	2,203
3000	2,212	2,209	2,207	2,203	2,200
4000	2,212	2,208	2,204	2,200	2,196
5000	2,211	2,206	2,201	2,196	2,191

Fonte: Elaboração Própria

Também não houve uma variação muito grande na densidade das 25 redes geradas do P-*space* Aumentado Pedestres. Porém, conforme observado na Tabela 15, a densidade cresce com o aumento das distâncias percorridas de bicicleta e a pé, de modo que a variação máxima da densidade entre essas 25 redes é de aproximadamente 11%.

Tabela 15 - Densidade do P-*space* Aumentado Pedestres

Densidade					
λr / λR	**100**	**200**	**300**	**400**	**500**
1000	0,0698	0,0700	0,0702	0,0705	0,0709
2000	0,0699	0,0705	0,0711	0,0718	0,0724
3000	0,0700	0,0710	0,0722	0,0731	0,0740
4000	0,0701	0,0715	0,0733	0,0746	0,0758
5000	0,0702	0,0721	0,0744	0,0761	0,0776

Fonte: Elaboração Própria

Na Figura 40, criada a partir da Tabela 16, é possível observar a variação do número de arestas nas 25 redes geradas do P-*space* Aumentado Pedestres. Quando a distância máxima percorrida a pé entre pontos de ônibus e estações de bicicletas é igual a 100 m, não há muita variação no número de arestas. No entanto, conforme essa distância máxima aumenta, a variação do número de arestas se torna mais significativa.

O número de arestas das 25 redes geradas do P-*space* Aumentado Pedestres é exibido na Tabela 16, na qual se verifica que o número de arestas varia de 1546679, na rede criada com os valores mínimos dos parâmetros λr e λR (equivalentes a 100 m e 1000 m, respectivamente), a 1717757, na rede gerada com os valores máximos dos parâmetros λr e λR (iguais a 500 m e 5000 m, respectivamente). Esta variação representa um crescimento em torno de 11% no número de arestas. Logo, quanto maior for a distância percorrida de bicicleta e a pé, maior será a quantidade de deslocamentos possíveis entre pontos com apenas uma linha de ônibus.

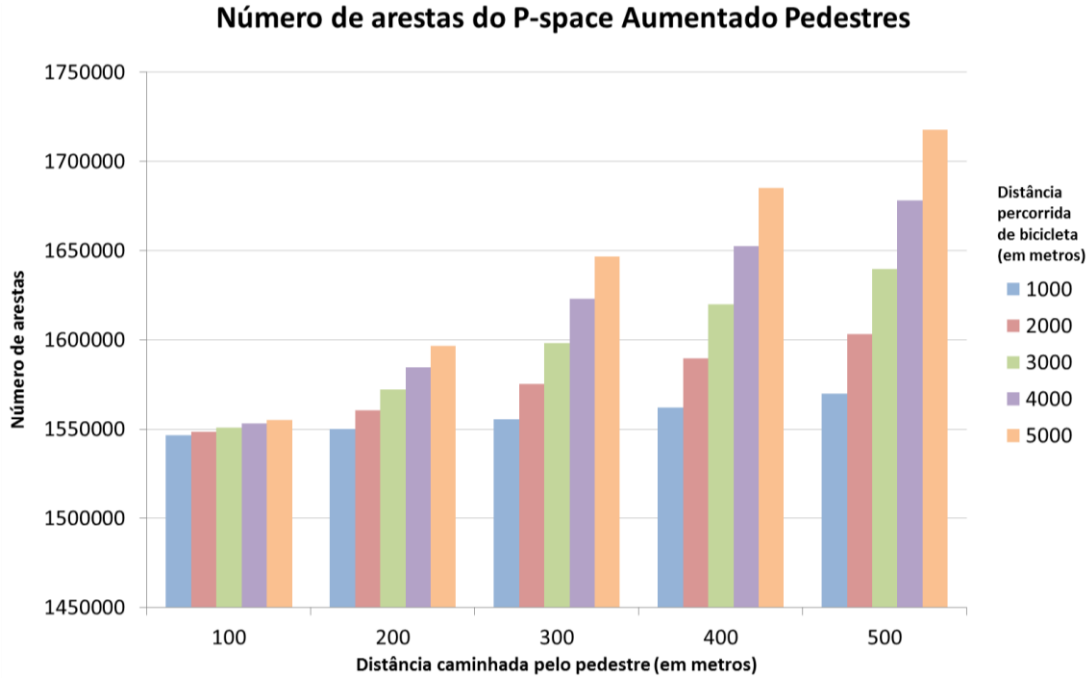


Figura 40 - Variação do número de arestas do P-*space* Aumentado Pedestres
Fonte: Elaboração Própria

Tabela 16 - Número de Arestas do P-*space* Aumentado Pedestres

Número de Arestas					
λR \ λr	**100**	**200**	**300**	**400**	**500**
1000	1546679	1550126	1555537	1562121	1569699
2000	1548632	1560637	1575398	1589685	1603177
3000	1550847	1572253	1598031	1619931	1639552
4000	1553051	1584572	1622868	1652693	1678095
5000	1555205	1596797	1646831	1685116	1717757

Fonte: Elaboração Própria

A análise do P-*space* Pedestres e P-*space* Aumentado Pedestres permite concluir que os deslocamentos de no máximo 400 m realizados pelos pedestres entre pontos de ônibus não geram mudanças significativas nos valores das propriedades dessas redes, quando comparado com as propriedades do P-*space* e P-*space* Aumentado.

Portanto, a utilização das bicicletas compartilhadas como alimentadoras do sistema de ônibus da cidade do Rio de Janeiro proporciona um aumento, ainda que pequeno, no alcance dos pontos de ônibus da cidade, tornando a rede de ônibus mais conectada. Porém, devido à disparidade entre a grande dispersão dos pontos de ônibus na cidade e a intensa concentração das estações de bicicletas compartilhadas em algumas regiões da cidade, os resultados obtidos com a análise dessas redes não são muito expressivos.

7.3. P-*space* Aumentado Limitado

Os resultados encontrados ao comparar as propriedades do P-*space* com P-*space* Aumentado não são muito significativos, pois as estações de bicicletas do *Bike* Rio estão concentradas em alguns locais específicos da cidade do Rio de Janeiro, enquanto os pontos de ônibus estão distribuídos por toda cidade.

Portanto, para analisar melhor o impacto das bicicletas compartilhadas na rede de ônibus foram demarcadas as regiões da cidade que seriam analisadas, de modo a compreender a maioria das estações de bicicletas do *Bike* Rio. Com este intuito, foram definidas duas áreas de interesse para este estudo: a área 1, composta pela Barra da Tijuca e Recreio dos Bandeirantes, e a área 2, que abrange a zona sul da cidade do Rio de Janeiro, Centro e parte da Tijuca e Maracanã. Essas regiões são os locais com maior quantidade de estações do *Bike* Rio, com cerca de 97% de todas as estações da cidade.

Assim, foram criadas, segundo as restrições $r \leq 500$ m e $1000 \text{ m} < R \leq 5000$ m, as redes P-*space* Limitado e P-*space* Aumentado Limitado, cujas propriedades são apresentadas na Tabela 17, na qual se verifica um aumento considerável na densidade, de 0,19 no P-*space* Limitado para 0,38 no P-*space* Aumentado Limitado. Este crescimento é decorrente do grande aumento no número de arestas (mais deslocamentos possíveis entre pontos usando apenas uma linha) em conjunto com a manutenção do número de vértices nas duas redes (ambas possuem 1300 pontos de ônibus).

Tabela 17 - Propriedades do P-*space* Limitado e P-*space* Aumentado Limitado

Propriedades da Rede	*P-space* Limitado	*P-space* Aumentado Limitado
Número de vértices	1300	1300
Número de arestas	160950	324983
Densidade	0,19	0,38
Grau Médio	247,62	499,97
Distância Média	1,89	1,65
Diâmetro	4	4

Fonte: Elaboração Própria

Nota-se na Tabela 17 que o grau médio também teve um crescimento significativo, maior que o dobro de seu valor, do P-*space* Limitado para o P-*space* Aumentado Limitado, aumentando assim, a quantidade de pontos de ônibus, em média, que se pode alcançar a partir de um ponto qualquer da cidade. Já a distância média foi reduzida em cerca de 13%, mas manteve seu valor aproximado igual a 2 o que significa que com 2 linhas de ônibus é possível se deslocar entre a maioria dos pontos. Como o diâmetro permaneceu igual a 4, com até 4 linhas de ônibus pode-se trafegar de um ponto de ônibus para outro qualquer. A distribuição de distâncias é apresentada na Figura 41.

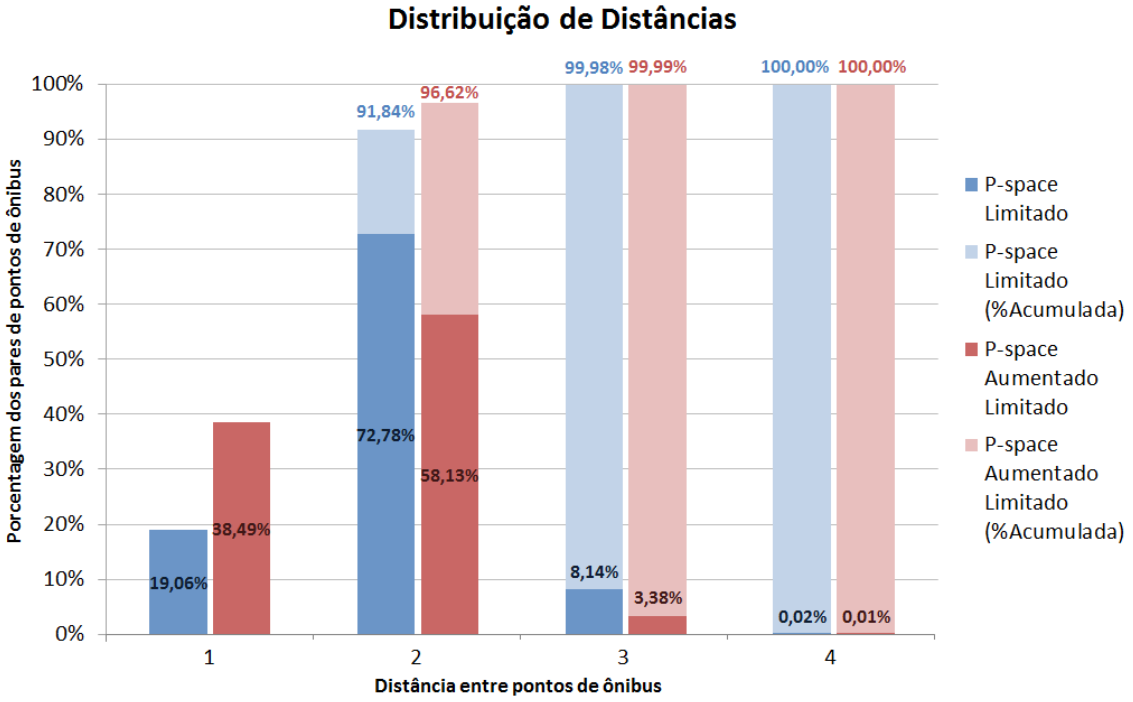


Figura 41 - Distribuição de Distâncias do P-*space* Limitado e P-*space* Aumentado Limitado
Fonte: Elaboração Própria

Na Figura 41 é comparada a distribuição de distâncias entre os pontos de ônibus do P-*space* Limitado e P-*space* Aumentado Limitado, sendo exibida a porcentagem de pares de pontos de ônibus que podem se alcançar para cada valor de distância. Assim, verifica-se que no P-*space* Aumentado Limitado houve um aumento significativo na porcentagem de pontos de ônibus com distância equivalente a 1 em comparação com o P-*space* Limitado, este percentual subiu de 19 % para 39%, aproximadamente. Porém, houve uma redução do número de pontos de ônibus que possuíam distâncias maiores ou iguais a 2. Isso significa que no P-*space* Aumentado mais pontos de ônibus podem ser alcançados utilizando apenas uma linha de ônibus.

Com até 2 linhas de ônibus pode-se alcançar cerca de 92% e 97% dos pontos no P-*space* Limitado e P-*space* Aumentado Limitado, respectivamente. Mais de 99% dos pontos de ônibus nessas duas redes são acessados com no máximo 3 linhas, no entanto, para alcançar todos os pontos são necessárias no máximo 4 linhas de ônibus.

Na Tabela 18 é verificado que somente o valor da centralização de proximidade do P-*space* Aumentado Limitado é superior ao do P-*space* Limitado, as centralizações de grau e intermediação são inferiores. Isso indica que no P-*space* Aumentado Limitado a variação dos valores da centralidade de proximidade de seus pontos de ônibus é maior do que no P-*space* Limitado.

Tabela 18 - Centralização do P-*space* Limitado e P-*space* Aumentado Limitado

Centralização da rede	***P-space* Limitado**	***P-space* Aumentado Limitado**
Grau	0,4598	0,4148
Proximidade	0,4129	0,4335
Intermediação	0,0156	0,0051

Fonte: Elaboração Própria

Além da centralização das redes, também foram analisadas as centralidades de grau, proximidade e intermediação dos pontos de ônibus do P-*space* Limitado e P-*space* Aumentado Limitado. Os valores de cada uma dessas medidas de centralidade foram divididos em seis intervalos iguais, sendo exibida a quantidade de pontos de ônibus em cada intervalo dos valores de centralidade.

Os valores da centralidade de grau do P-*space* Limitado e P-*space* Aumentado Limitado são apresentados na Figura 42, na qual é verificado que a quantidade de

pontos de ônibus em cada intervalo de valores da centralidade de grau varia muito entre as duas redes analisadas. A faixa de intervalo de grau com maior número de pontos de ônibus no P-*space* Aumentado Limitado, varia de 401 a 600 com 395 pontos, sendo maior que a do P-*space* Limitado, que varia entre 201 e 400 possuindo 597 pontos.

No P-*space* Aumentado Limitado o número de pontos de ônibus a partir do terceiro intervalo de grau é maior que no P-*space* Limitado, possuindo assim, uma maior quantidade de pontos com grau elevado, ou seja, que podem alcançar muitos pontos da cidade. O intervalo com maior grau, que varia de 1001 a 1200, possui 1 ponto de ônibus no P-*space* Aumentado Limitado e nenhum no P-*space* Limitado, isso significa que a partir desse ponto de ônibus é possível ir para mais de 1000 pontos da cidade, ou seja, esse ponto pode alcançar mais de 76% dos 1300 pontos de ônibus da área limitada analisada da cidade do Rio de Janeiro.

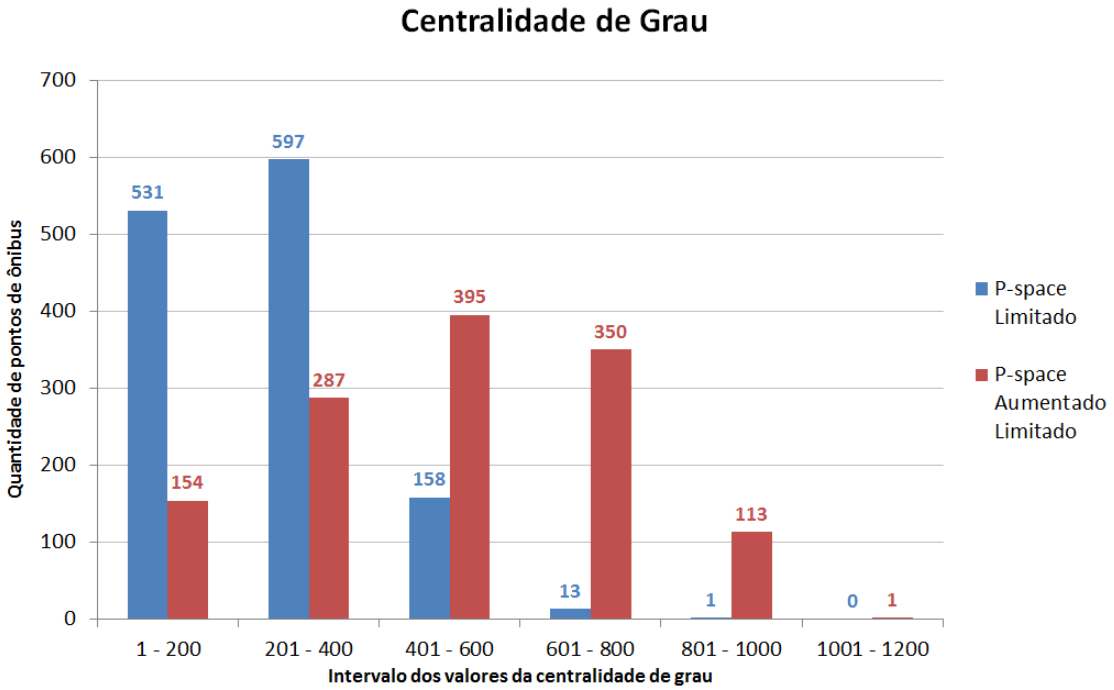


Figura 42 - Centralidade de Grau do P-*space* Limitado e P-*space* Aumentado Limitado
Fonte: Elaboração Própria

Na Figura 43 é exibida a quantidade de pontos de ônibus nos seis intervalos dos valores da centralidade de proximidade do P-*space* Limitado e P-*space* Aumentado Limitado. Verifica-se que o número de pontos de ônibus nos três últimos intervalos no P-*space* Aumentado Limitado é muito maior que no P-*space* Limitado, de tal forma que,

o intervalo com maior valor de centralidade de proximidade (que varia de 0,78 a 0,86) possui 14 pontos de ônibus no P-*space* Aumentado Limitado e nenhum no P-*space* Limitado. Esses pontos de ônibus com centralidade de proximidade alta possuem distância menor para os outros pontos da rede, sendo atendidos, geralmente, por muitas linhas de ônibus que os conectam com os demais pontos.

Em ambas as redes, o intervalo de centralidade de proximidade com maior número de pontos de ônibus varia entre 0,54 e 0,62 possuindo 569 pontos no P-*space* Limitado e 502 pontos no P-*space* Aumentado Limitado.

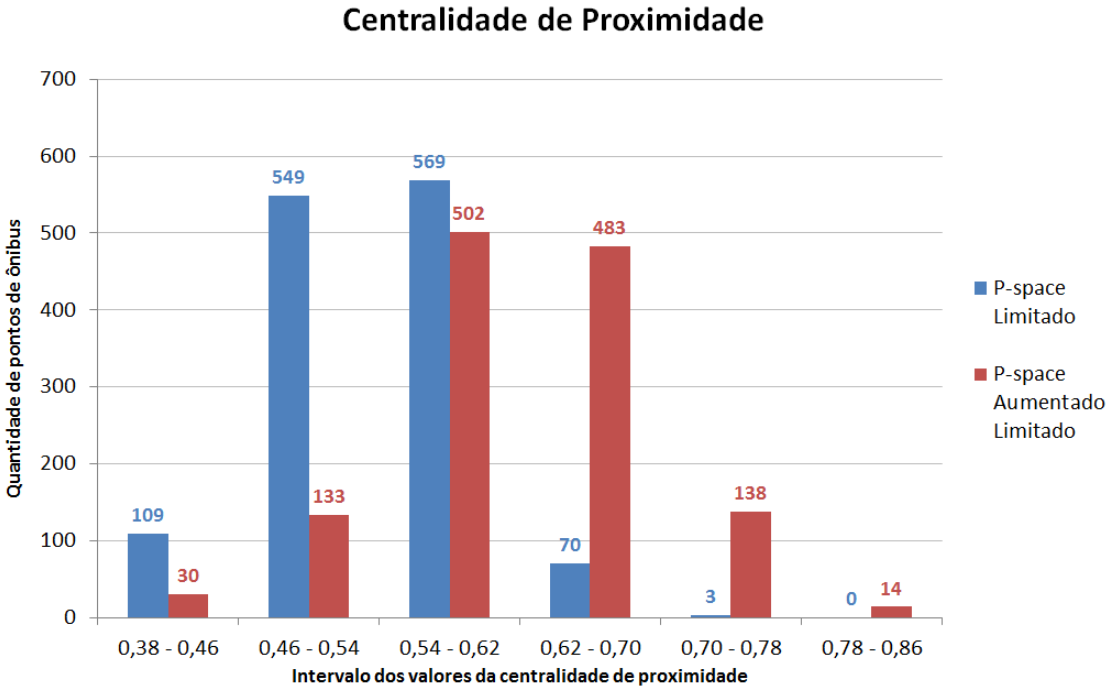


Figura 43 - Centralidade de Proximidade do P-*space* Limitado e P-*space* Aumentado Limitado
Fonte: Elaboração Própria

A Figura 44 mostra os valores da centralidade de intermediação dos pontos de ônibus das redes P-*space* Limitado e P-*space* Aumentado Limitado divididos em seis intervalos, sendo possível verificar que, em ambas as redes, a maioria dos pontos de ônibus possui centralidade de intermediação na menor faixa de intervalo, de 0 a 0,003. A quantidade de pontos de ônibus neste intervalo representa cerca de 95,7% dos pontos no P-*space* Limitado (1244 pontos) e 98,9% dos pontos no P-*space* Aumentado Limitado (1286 pontos), que possui assim, um número maior de pontos de ônibus com centralidade de intermediação baixa, sendo motivada, provavelmente, pelo grande

aumento do número de arestas no P-*space* Aumentado Limitado (cerca de 102% maior que no P-*space* Limitado).

Como essas redes são muito densas, existem muitas ligações entre os pontos de ônibus, e assim, muitos caminhos mais curtos entre eles, o que torna o valor da centralidade de intermediação dos pontos dessas redes muito baixo. Por isso, nos três intervalos com maiores valores de centralidade de intermediação, existem apenas 8 pontos no P-*space* Limitado, menos de 1% do total de pontos, e nenhum no P-*space* Aumentado Limitado.

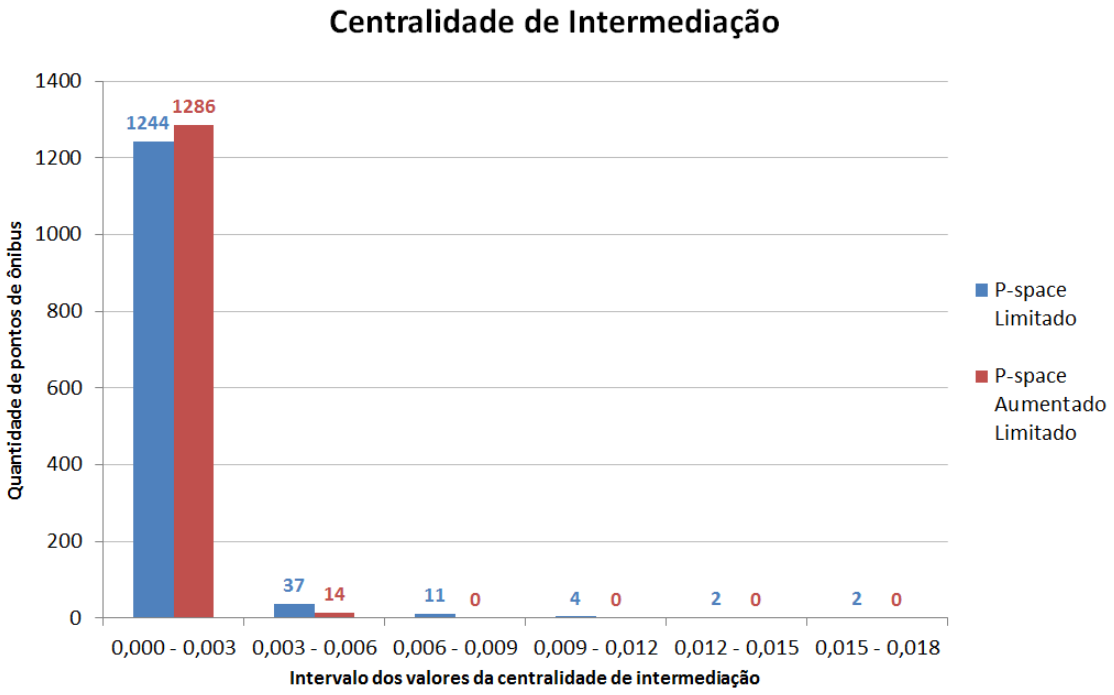


Figura 44 - Centralidade de Intermediação do P-*space* Limitado e P-*space* Aumentado Limitado
Fonte: Elaboração Própria

Para analisar a alteração dos valores das propriedades (grau médio, distância média, diâmetro, densidade e número de arestas) do P-*space* Aumentado com a variação da distância percorrida de bicicleta entre suas estações (R) e a pé entre pontos de ônibus e estações de bicicletas (r), foram criadas 25 redes do P-*space* Aumentado Limitado, desenvolvidas a partir da variação dos parâmetros λR de 1000 m a 5000 m em intervalos de 1000 m e λr de 100 m a 500 m em intervalos de 100 m, de acordo com as restrições $R \leq \lambda R$ e $r \leq \lambda r$.

A Figura 45, gerada a partir da Tabela 19, exibe a variação do grau médio das 25 redes do P-*space* Aumentado Limitado, sendo possível verificar que, à medida que a distância percorrida de bicicleta entre suas estações e a pé do ponto de ônibus à estação de bicicleta aumenta, o mesmo ocorre com o grau médio. No entanto, quando λr é maior que 300 m, este crescimento do grau médio é reduzido, exceto para as redes geradas com λR igual a 1000 m.

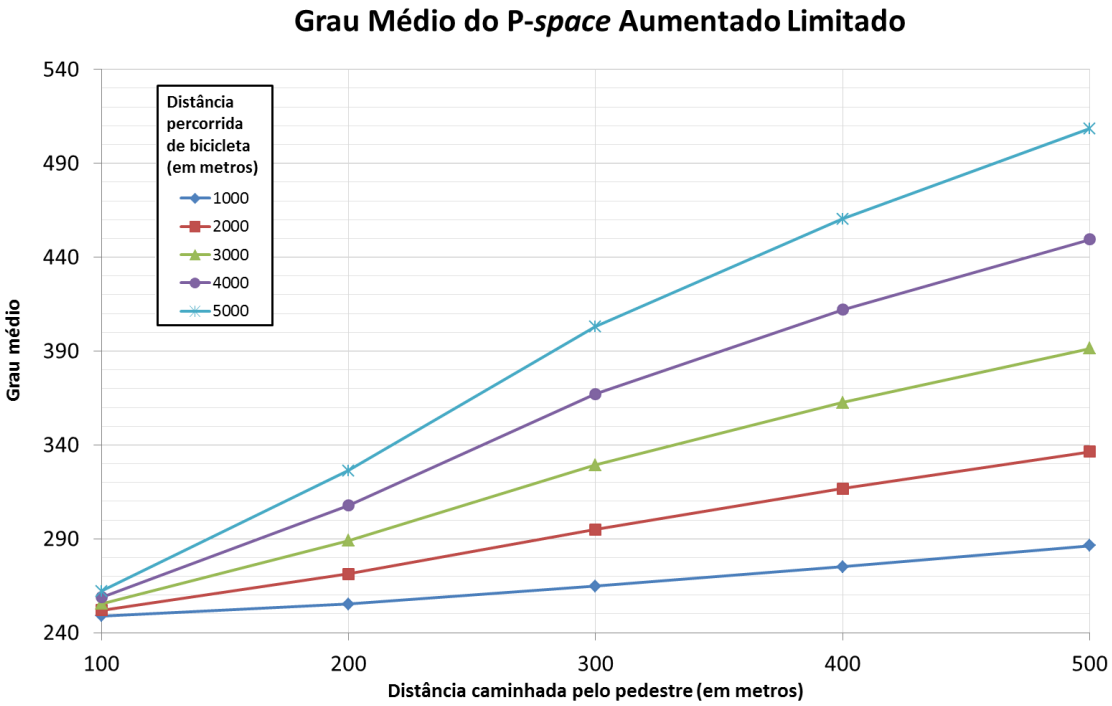


Figura 45 - Variação do grau médio do P-*space* Aumentado Limitado
Fonte: Elaboração Própria

Tabela 19 - Grau Médio do P-*space* Aumentado Limitado

Grau Médio					
λR \ λr	**100**	**200**	**300**	**400**	**500**
1000	249,00	255,34	264,79	275,19	286,46
2000	252,00	271,35	294,89	316,70	336,37
3000	255,41	289,08	329,43	362,64	391,34
4000	258,80	307,78	367,09	412,01	449,41
5000	262,11	326,23	403,17	460,34	508,44

Fonte: Elaboração Própria

A Tabela 19 mostra que o grau médio teve uma variação máxima em torno de 104% entre as 25 redes geradas do P-*space* Aumentado Limitado, variando de aproximadamente 249 (rede com distância máxima percorrida de bicicleta e a pé iguais a 1000 m e 100 m, respectivamente) a 508 (rede com distância máxima percorrida de bicicleta e a pé equivalentes a 5000 m e 500 m, respectivamente).

Quanto à distância média entre os pontos de ônibus das 25 redes do P-*space* Aumentado Limitado, apresentada na Tabela 20, observa-se que à medida que aumenta a distância percorrida de bicicleta (entre suas estações) e a pé (entre pontos de ônibus e estações de bicicletas), a distância média entre os pontos de ônibus diminui, variando de 1,886 (para a rede gerada com valor mínimo de λr e λR) a 1,643 (para a rede criada com valor máximo de λr e λR). Logo, para essas 25 redes a distância média entre pontos é igual a aproximadamente 2, sendo assim, são necessárias em média 2 linhas de ônibus para se deslocar entre os pontos da cidade. Como o diâmetro permanece igual a 4 para todas as 25 redes, constata-se que, com no máximo 4 linhas de ônibus é possível se deslocar entre todos os pontos de ônibus.

Tabela 20 - Distância Média do P-*space* Aumentado Limitado

Distância Média					
λr / λR	**100**	**200**	**300**	**400**	**500**
1000	1,886	1,876	1,864	1,849	1,835
2000	1,881	1,858	1,834	1,808	1,787
3000	1,876	1,841	1,803	1,768	1,740
4000	1,873	1,824	1,770	1,726	1,691
5000	1,868	1,806	1,739	1,686	1,643

Fonte: Elaboração Própria

Também foi obtida a densidade das 25 redes geradas do P-*space* Aumentado Limitado exibida na Tabela 21, na qual é verificado que conforme a distância percorrida de bicicleta (entre suas estações) e a pé (entre pontos de ônibus e estações de bicicletas) aumenta, as redes tornam-se mais densas. Isso significa um aumento na proporção de deslocamentos possíveis entre pontos usando apenas uma linha de ônibus. Como a maior densidade verificada nessas 25 redes é igual a 0,3914 e a menor equivale a 0,1917 é possível afirmar que houve um aumento de aproximadamente 104%.

Tabela 21 - Densidade do P-*space* Aumentado Limitado

Densidade					
λr / λR	**100**	**200**	**300**	**400**	**500**
1000	0,1917	0,1966	0,2038	0,2118	0,2205
2000	0,1940	0,2089	0,2270	0,2438	0,2589
3000	0,1966	0,2225	0,2536	0,2792	0,3013
4000	0,1992	0,2369	0,2826	0,3172	0,3460
5000	0,2018	0,2511	0,3104	0,3544	0,3914

Fonte: Elaboração Própria

Na Figura 46 é exibido o número de arestas das 25 redes geradas do P-*space* Aumentado Limitado, sendo possível observar que com o aumento da distância percorrida de bicicleta entre suas estações e a pé dos pontos de ônibus a estações de bicicletas (e vice-versa), ocorre um aumento do número de arestas das redes.

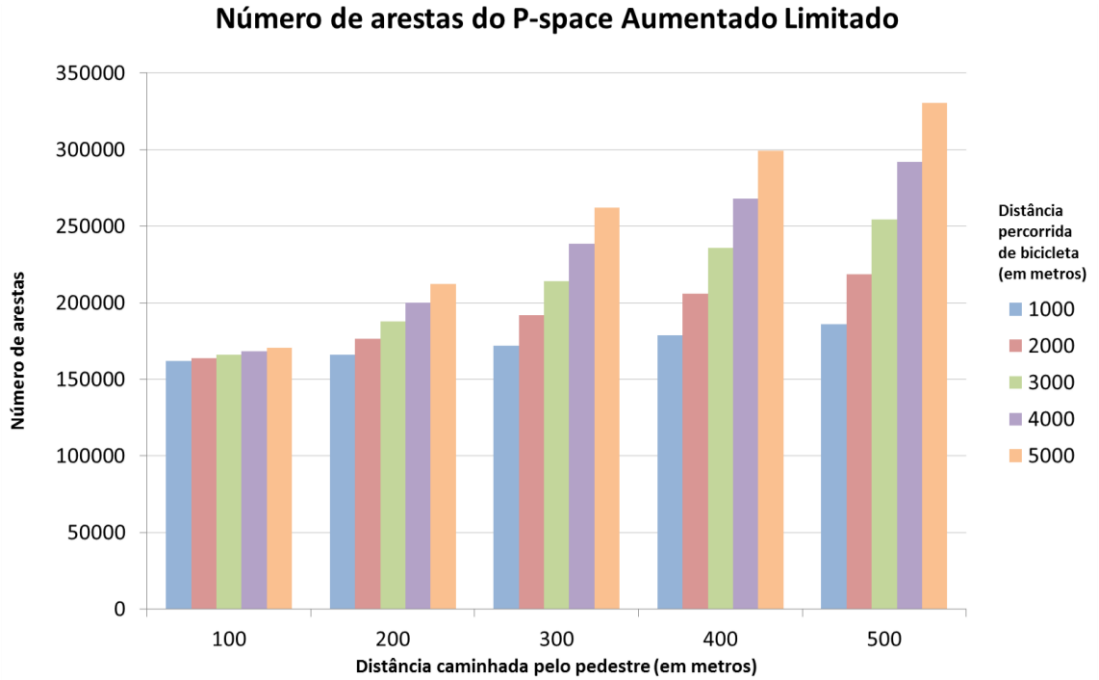


Figura 46 - Variação do número de arestas do P-*space* Aumentado Limitado
Fonte: Elaboração Própria

A Figura 46 é elaborada a partir da Tabela 22, na qual se verifica que a rede com o maior número de arestas permite que a distância máxima percorrida de bicicleta seja de 5000 m e a distância máxima caminhada pelo pedestre seja de 500 m. Por outro lado, a rede com o menor número de arestas admite deslocamentos de bicicleta e a pé de, no

máximo, 1000 m e 100 m, respectivamente. Logo, entre essas 25 redes o número de arestas pode aumentar até 104%.

Tabela 22 - Número de Arestas do P-*space* Aumentado Limitado

Número de Arestas					
λr / λR	**100**	**200**	**300**	**400**	**500**
1000	161848	165971	172116	178874	186199
2000	163801	176377	191679	205854	218643
3000	166016	187901	214131	235714	254369
4000	168220	200058	238611	267805	292117
5000	170374	212047	262061	299221	330486

Fonte: Elaboração Própria

Dessa forma, ao comparar as propriedades das redes P-*space* Limitado e P-*space* Aumentado Limitado foi verificado um aumento significativo no valor da maioria das propriedades analisadas. Isso indica que, ao limitar a área de estudo para as regiões com maior concentração de estações de bicicletas, são obtidos resultados mais significativos.

Portanto, ao considerar as áreas delimitadas para elaboração dessas redes como uma representação da cidade do Rio de Janeiro como um todo, é possível concluir que, com estações de bicicletas compartilhadas distribuídas por toda cidade, a mesma se tornaria mais integrada. Tendo em vista que, nessas redes analisadas, a utilização das bicicletas compartilhadas como alimentadoras dos ônibus contribui para o aumento do número de deslocamentos possíveis entre os pontos e reduz a quantidade de linhas de ônibus necessárias para se deslocar entre pontos de ônibus da cidade.

7.4. P-*space* Aumentado Limitado Pedestres

Seguindo a mesma premissa de limitação da área de estudo do P-*space* Limitado e P-*space* Aumentado Limitado, foram desenvolvidas as redes P-*space* Limitado Pedestres e P-*space* Aumentado Limitado Pedestres, nas quais são considerados os deslocamentos realizados a pé entre pontos de ônibus.

A Tabela 23 mostra os valores das propriedades obtidas das redes P-*space* Limitado Pedestres e P-*space* Aumentado Limitado Pedestres, que foram elaboradas de

acordo com as restrições $r \leq 500$ m e $1000 \text{ m} < R \leq 5000$ m, nas quais r corresponde à distância percorrida a pé entre pontos de ônibus e estações de bicicleta e R representa a distância viajada de bicicleta entre suas estações.

Verifica-se na Tabela 23 um aumento considerável no número de arestas, densidade e grau médio do P-*space* Aumentado Limitado Pedestres em comparação com o P-*space* Limitado Pedestres. Como o número de vértices (pontos de ônibus) permanece o mesmo em ambas as redes e a quantidade de arestas praticamente dobra, ocorre um crescimento em torno de 100% na densidade da rede, aumentando assim, a proporção de deslocamentos possíveis entre pontos usando apenas uma linha de ônibus. Esta taxa de crescimento também é verificada no grau médio, que aumentou para cerca de 503, que é o número de pontos de ônibus, em média, para os quais é possível ir sem baldeação a partir de um determinado ponto da rede.

Tabela 23 - Propriedades do P-*space* Limitado Pedestres e P-*space* Aumentado Limitado Pedestres

Propriedades da Rede	***P-space* Limitado Pedestres**	***P-space* Aumentado Limitado Pedestres**
Número de vértices	1300	1300
Número de arestas	163720	327257
Densidade	0,19	0,39
Grau Médio	251,88	503,47
Distância Média	1,88	1,65
Diâmetro	4	4

Fonte: Elaboração Própria

Também é observado na Tabela 23 uma diminuição de aproximadamente 12% da distância média do P-*space* Limitado Pedestres para o P-*space* Aumentado Limitado Pedestres, porém seu valor aproximado equivale a 2 em ambas as redes, sendo assim, usando em média 2 linhas de ônibus pode-se trafegar entre a maioria dos pontos. O diâmetro, maior caminho mais curto, é igual a 4 nas duas redes, isso significa que, com 4 linhas de ônibus é possível se deslocar entre qualquer par de pontos de ônibus.

A distribuição de distâncias apresentada na Figura 47 mostra um aumento significativo na porcentagem de pares de pontos que podem se alcançar utilizando apenas uma linha de ônibus no P-*space* Aumentado Limitado Pedestres em relação ao P-*space* Limitado Pedestres. No entanto, para as distâncias maiores que 1 houve uma

diminuição desta porcentagem, principalmente na distância equivalente a 2. Com até 2 linhas de ônibus pode-se alcançar cerca de 93% dos pontos no P-*space* Limitado Pedestres e 97% dos pontos no P-*space* Aumentado Limitado Pedestres. Com até 3 linhas este número sobe para mais de 99% nas duas redes. Com no máximo 4 linhas de ônibus é possível se deslocar entre todos os pontos de ônibus da cidade.

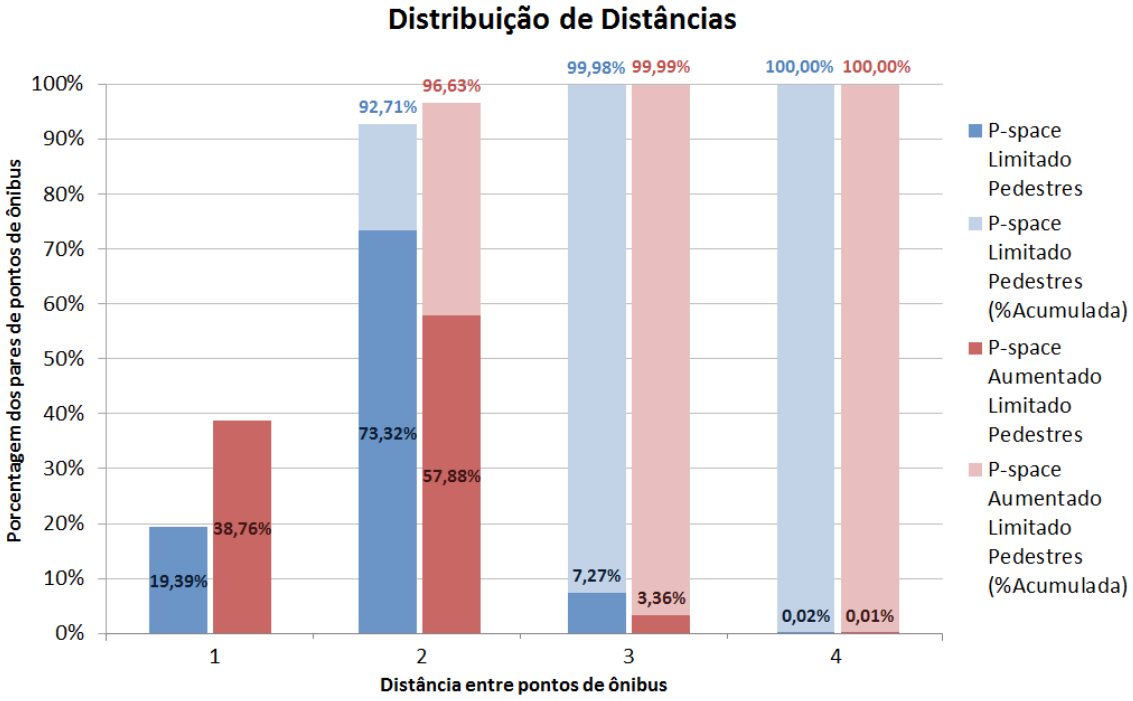


Figura 47 - Distribuição de Distâncias do P-*space* Limitado Pedestres e P-*space* Aumentado Limitado Pedestres
Fonte: Elaboração Própria

Na Tabela 24 nota-se que os valores da centralização de grau e intermediação do P-*space* Limitado Pedestres são maiores que os do P-*space* Aumentado Limitado Pedestres, sendo considerada assim, uma rede mais centralizada (exceto para a centralização de proximidade, que é maior no P-*space* Aumentado Limitado Pedestres).

Tabela 24 - Centralização do P-*space* Limitado Pedestres e P-*space* Aumentado Limitado Pedestres

Centralização da rede	***P-space* Limitado Pedestres**	***P-space* Aumentado Limitado Pedestres**
Grau	0,4627	0,4137
Proximidade	0,4136	0,4333
Intermediação	0,0149	0,0051

Fonte: Elaboração Própria

Também foram obtidos os valores das centralidades de grau, proximidade e intermediação dos pontos de ônibus das redes P-*space* Limitado Pedestres e P-*space* Aumentado Limitado Pedestres. Esses valores foram divididos em seis intervalos iguais para cada medida de centralidade, visando comparar a quantidade de pontos de ônibus em cada faixa de intervalo nessas duas redes.

Verifica-se na Figura 48 que no P-*space* Aumentado Limitado Pedestres existe 1 ponto de ônibus no maior intervalo de grau, que varia de 1001 a 1200, ou seja, a partir desse ponto pode-se alcançar, usando somente uma linha de ônibus, mais de 1000 pontos de ônibus da área limitada analisada da cidade do Rio de Janeiro. No P-*space* Limitado Pedestres não há pontos neste intervalo, possuindo maior quantidade de pontos no intervalo de grau entre 201 e 400, que possui 592 pontos. Já no P-*space* Aumentado Limitado Pedestres o intervalo de grau com mais pontos varia de 401 a 600 com 389 pontos.

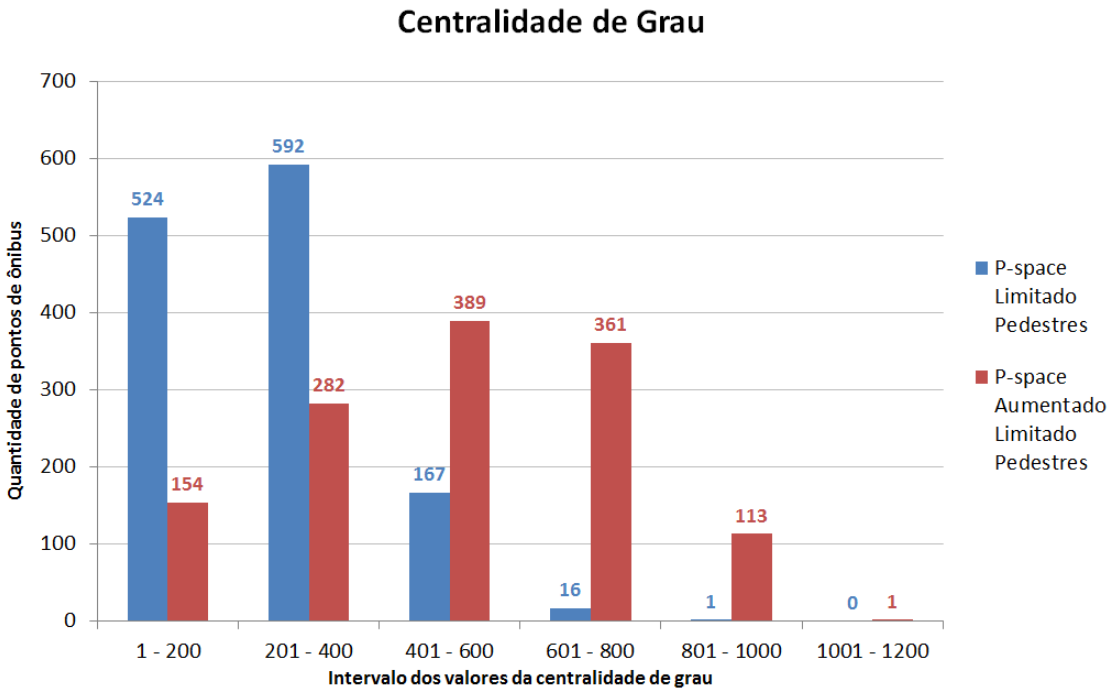


Figura 48 - Centralidade de Grau do P-*space* Limitado Pedestres e P-*space* Aumentado Limitado Pedestres
Fonte: Elaboração Própria

O intervalo com maior valor de centralidade de proximidade do P-*space* Aumentado Limitado Pedestres varia de 0,78 a 0,86 e possui 16 pontos de ônibus. Este mesmo intervalo não possui pontos no P-*space* Limitado Pedestres, cujo maior intervalo

varia de 0,70 a 0,78 com 3 pontos, enquanto no P-*space* Aumentado Limitado Pedestres este mesmo intervalo tem 141 pontos, conforme pode ser observado na Figura 49. Logo, o P-*space* Aumentado Limitado Pedestres tem um número muito maior de pontos de ônibus com alto valor de centralidade de proximidade que o P-*space* Limitado Pedestres, possuindo assim, maior quantidade de pontos a partir dos quais é possível se deslocar para outros pontos usando poucas linhas de ônibus. O intervalo com mais pontos no P-*space* Limitado Pedestres varia de 0,54 a 0,62 possuindo 593 pontos, enquanto no P-*space* Aumentado Limitado Pedestres existem dois intervalos com maior número de pontos que variam de 0,54 a 0,62 e 0,62 a 0,70 com 490 pontos em cada.

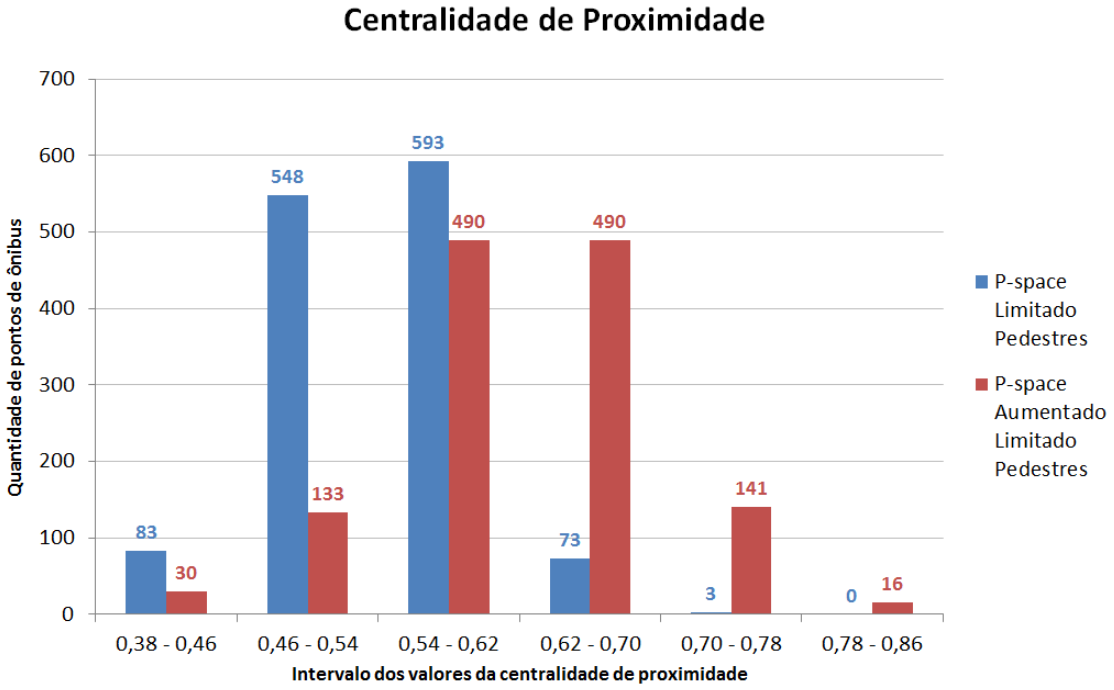


Figura 49 - Centralidade de Proximidade do P-*space* Limitado Pedestres e P-*space* Aumentado Limitado Pedestres
Fonte: Elaboração Própria

É observado na Figura 50 que a distribuição dos pontos de ônibus pelos intervalos de centralidade de intermediação no P-*space* Limitado Pedestres e P-*space* Aumentado Limitado Pedestres é parecida, de modo que, nas duas redes o intervalo de centralidade de intermediação com maior quantidade de pontos de ônibus varia de 0 a 0,003 possuindo 1245 pontos no P-*space* Limitado Pedestres e 1286 pontos no P-*space* Aumentado Limitado Pedestres, equivalente a cerca de 96% e 99% do total de pontos da cidade, respectivamente. Os três intervalos com maiores valores de centralidade de

intermediação variam entre 0,009 e 0,018 e possuem apenas 8 pontos no P-*space* Limitado Pedestres e nenhum no P-*space* Aumentado Limitado Pedestres.

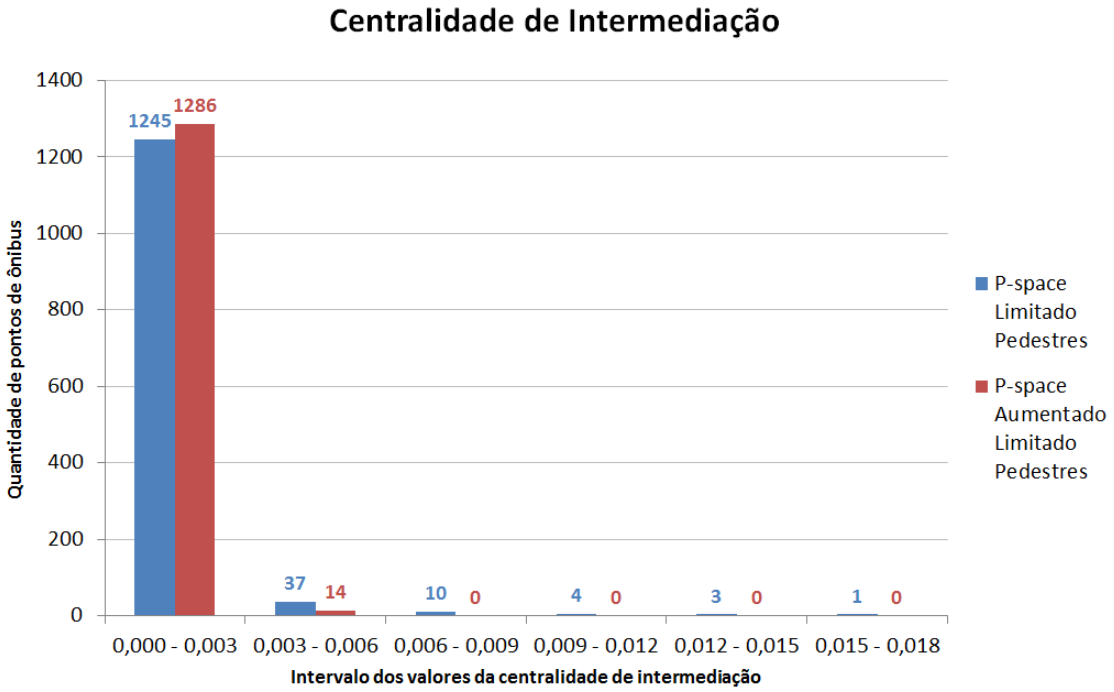


Figura 50 - Centralidade de Intermediação do P-*space* Limitado Pedestres e P-*space* Aumentado Limitado Pedestres
Fonte: Elaboração Própria

Com o intuito de analisar o efeito da variação da distância percorrida de bicicleta entre suas estações (R) e caminhada pelo pedestre entre pontos de ônibus e estações de bicicletas (r) nos valores das propriedades do P-*space* Aumentado Limitado Pedestres, foram geradas 25 redes do P-*space* Aumentado Limitado Pedestres. Essas redes foram criadas a partir da variação dos parâmetros λR e λr, de 1000 m a 5000 m em intervalos de 1000 m e de 100 m a 500 m em intervalos de 100 m, respectivamente, seguindo as restrições $R \leq \lambda R$ e $r \leq \lambda r$.

A variação do grau médio das 25 redes geradas do P-*space* Aumentado Limitado Pedestres é retratada na Figura 51, na qual é possível observar que, quanto maior é a distância percorrida de bicicleta e a pé, maior é o grau médio das redes. Na Tabela 25, a partir da qual foi gerada a Figura 51, é verificado que o menor valor de grau médio obtido nessas 25 redes equivale a aproximadamente 253 e o maior é igual a 509, representando um aumento em torno de 101% no grau médio. Portanto, na rede com a

maior distância máxima percorrida de bicicleta e a pé é possível se deslocar, em média, para 509 pontos de ônibus a partir de um determinado ponto da cidade.

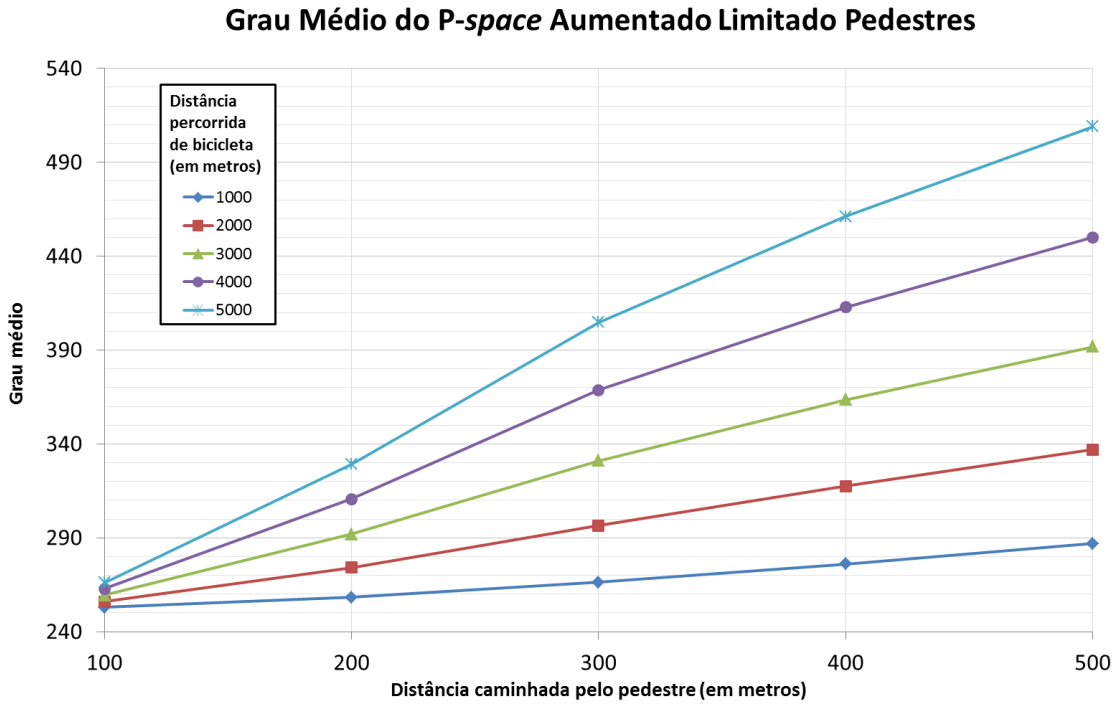


Figura 51 - Variação do grau médio do P-*space* Aumentado Limitado Pedestres
Fonte: Elaboração Própria

Tabela 25 - Grau Médio do P-*space* Aumentado Limitado Pedestres

Grau Médio					
λR \ λr	**100**	**200**	**300**	**400**	**500**
1000	253,03	258,24	266,35	276,08	287,04
2000	256,03	274,25	296,45	317,59	336,93
3000	259,44	291,98	330,99	363,53	391,90
4000	262,83	310,68	368,65	412,90	449,97
5000	266,14	329,13	404,73	461,23	509,00

Fonte: Elaboração Própria

Ao observar os valores da distância média das 25 redes do P-*space* Aumentado Limitado Pedestres nota-se que à medida que os parâmetros λr e λR aumentam, menor é o valor da distância média, que nessas 25 redes tem variação máxima de 1,877 a 1,642. Conforme verificado na Tabela 26. Portanto, utilizando em média 2 linhas de ônibus (valor aproximado) é possível se deslocar de um ponto a outro qualquer da cidade. Para

as 25 redes geradas do P-*space* Aumentado Limitado Pedestres, o diâmetro obtido foi igual a 4. Sendo assim, para se deslocar entre os dois pontos de ônibus mais distantes são necessárias 4 linhas de ônibus.

Tabela 26 - Distância Média do P-*space* Aumentado Limitado Pedestres

Distância Média					
λr / λR	**100**	**200**	**300**	**400**	**500**
1000	1,877	1,870	1,861	1,848	1,834
2000	1,872	1,852	1,831	1,807	1,786
3000	1,868	1,835	1,800	1,768	1,740
4000	1,864	1,818	1,768	1,725	1,691
5000	1,859	1,800	1,736	1,685	1,642

Fonte: Elaboração Própria

Na Tabela 27 foi verificado que as redes tornaram-se mais densas com o aumento dos parâmetros λR e λr associados, respectivamente, a distância percorrida de bicicleta (entre suas estações) e a pé (entre pontos de ônibus e estações de bicicletas). Das 25 redes geradas do P-*space* Aumentado Limitado Pedestres, a com maior densidade, igual a 0,3918, foi criada com os maiores valores desses parâmetros, e a de menor densidade, igual a 0,1948, com os menores valores de λR e λr. Sendo assim, a densidade pode aumentar em até 101%, aproximadamente, quanto maior for a distância percorrida de bicicleta e a pé. Isso significa mais deslocamentos possíveis entre pontos de ônibus usando apenas uma linha de ônibus.

Tabela 27 - Densidade do P-*space* Aumentado Limitado Pedestres

Densidade					
λr / λR	**100**	**200**	**300**	**400**	**500**
1000	0,1948	0,1988	0,2050	0,2125	0,2210
2000	0,1971	0,2111	0,2282	0,2445	0,2594
3000	0,1997	0,2248	0,2548	0,2799	0,3017
4000	0,2023	0,2392	0,2838	0,3179	0,3464
5000	0,2049	0,2534	0,3116	0,3551	0,3918

Fonte: Elaboração Própria

A Figura 52, desenvolvida a partir da Tabela 28, mostra o número de arestas de cada uma das 25 redes geradas do P-*space* Aumentado Limitado Pedestres, permitindo observar sua variação segundo a distância percorrida de bicicleta entre suas estações (*R*) e a pé entre pontos de ônibus e estações de bicicletas (*r*). O número de arestas cresce com o aumento dos valores de *R* e *r*, assim verifica-se que o número de arestas dessas 25 redes varia entre 164467 e 330849, que representa um crescimento máximo de 101% na quantidade de deslocamentos possíveis entre os pontos de ônibus da cidade do Rio de Janeiro usando somente uma linha de ônibus. Conforme apresentado na Tabela 28.

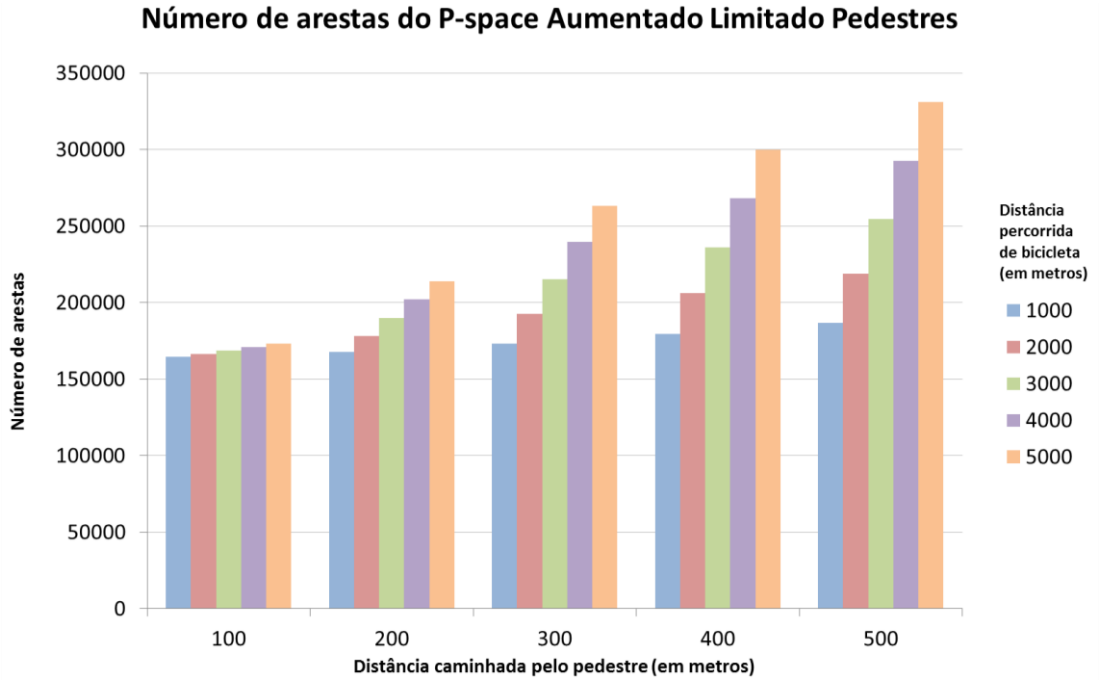


Figura 52 - Variação do número de arestas do P-*space* Aumentado Limitado Pedestres
Fonte: Elaboração Própria

Tabela 28 - Número de Arestas do P-*space* Aumentado Limitado Pedestres

Número de Arestas					
λr / λR	**100**	**200**	**300**	**400**	**500**
1000	164467	167856	173127	179454	186574
2000	166420	178262	192690	206433	219006
3000	168635	189786	215142	236293	254732
4000	170839	201943	239622	268384	292480
5000	172993	213932	263072	299800	330849

Fonte: Elaboração Própria

A partir da análise comparativa das redes P-*space* Limitado Pedestres e P-*space* Aumentado Limitado Pedestres, foi observado que a integração das bicicletas compartilhadas na rede de ônibus da cidade do Rio de Janeiro provoca um aumento considerável no número de deslocamentos possíveis entre os pontos de ônibus, tornando a cidade mais conectada, e reduzindo a quantidade de linhas de ônibus necessárias para trafegar entre pares de pontos de ônibus da cidade.

Também foi verificado que os deslocamentos de até 400 m percorridos pelos pedestres entre pontos de ônibus considerados no P-*space* Limitado Pedestres e P-*space* Aumentado Limitado Pedestres não alteram de modo significativo os valores das propriedades dessas redes, em comparação com as propriedades do P-*space* Limitado e P-*space* Aumentado Limitado, respectivamente. Além disso, foi constatado que a limitação da área de interesse, estipulada para analisar apenas as regiões com maior quantidade de estações de bicicletas, gera resultados mais expressivos.

7.5. Síntese dos Resultados

Os valores das propriedades obtidas das redes completas e limitadas são apresentados na Tabela 29 e na Tabela 30, respectivamente. As propriedades analisadas nas oito redes geradas neste estudo foram: número de arestas e de vértices, densidade, grau médio, distância média e diâmetro.

Tabela 29 - Propriedades das redes completas

Propriedades	**P-*space***	**P-*space* Aumentado**	**P-*space* Pedestres**	**P-*space* Aumentado Pedestres**
Número de vértices	6656	6656	6656	6656
Número de arestas	1537649	1705762	1545932	1713549
Densidade	0,07	0,08	0,07	0,08
Grau Médio	462,03	512,55	464,52	514,89
Distância Média	2,22	2,19	2,21	2,19
Diâmetro	4	4	4	4

Fonte: Elaboração Própria

Tabela 30 - Propriedades das redes limitadas

Propriedades	P-*space* Limitado	P-*space* Aumentado Limitado	P-*space* Limitado Pedestres	P-*space* Aumentado Limitado Pedestres
Número de vértices	1300	1300	1300	1300
Número de arestas	160950	324983	163720	327257
Densidade	0,19	0,38	0,19	0,39
Grau Médio	247,62	499,97	251,88	503,47
Distância Média	1,89	1,65	1,88	1,65
Diâmetro	4	4	4	4

Fonte: Elaboração Própria

Ao comparar os valores das propriedades das oito redes geradas neste estudo é verificado que o número de arestas das redes completas (P-*space*, P-*space* Aumentado, P-*space* Pedestres, P-*space* Aumentado Pedestres) é muito maior que o das redes limitadas (P-*space* Limitado, P-*space* Aumentado Limitado, P-*space* Limitado Pedestres e P-*space* Aumentado Limitado Pedestres). Isso é justificado pela redução da área de estudo nas redes limitadas, visto que nessas redes foram analisadas somente as regiões da cidade do Rio de Janeiro com grande concentração de estações de bicicletas compartilhadas, diminuindo assim, a quantidade de vértices (pontos de ônibus) das redes limitadas e, consequentemente, seu número de arestas.

Na Tabela 31 é exibida a variação percentual dos valores das propriedades das redes completas em comparação com P-*space*. Como todas as redes completas possuem o mesmo número de vértices (pontos de ônibus) não há variação desta propriedade, o mesmo ocorre com as redes limitadas.

Tabela 31 - Variação das propriedades das redes completas em comparação com P-*space*

Propriedades	P-*space* Aumentado	P-*space* Pedestres	P-*space* Aumentado Pedestres
Número de vértices	0,0%	0,0%	0,0%
Número de arestas	+10,9%	+0,5%	+11,4%
Densidade	+10,9%	+0,5%	+11,4%
Grau Médio	+10,9%	+0,5%	+11,4%
Distância Média	-1,1%	-0,1%	-1,2%
Diâmetro	0,0%	0,0%	0,0%

Fonte: Elaboração Própria

Nota-se na Tabela 31 que entre o P-*space* e as demais redes completas criadas neste estudo não houve grande variação nos valores das propriedades analisadas, principalmente entre o P-*space* e o P-*space* Pedestres que obteve um aumento de apenas cerca de 0,5% no número de arestas, densidade e grau médio e redução em torno de 0,1% na distância média entre pontos. Isso ocorre devido à grande quantidade e dispersão dos pontos de ônibus na cidade do Rio de Janeiro em comparação com o pequeno número e alta concentração das estações de bicicletas compartilhadas em algumas áreas da cidade.

No entanto, ao analisar a variação percentual dos valores das propriedades das redes limitadas em comparação com o P-*space* Limitado apresentada na Tabela 32, é observado que o número de arestas, densidade e grau médio mais que dobraram nas redes de ônibus limitadas integradas com as bicicletas compartilhadas. Dessa forma, é possível concluir que se houvessem estações de bicicletas compartilhadas distribuídas na mesma proporção por toda a cidade do Rio de Janeiro, existiria um número muito maior de opções de deslocamentos entre pontos e a rede de ônibus da cidade se tornaria mais conectada.

Tabela 32 - Variação das propriedades das redes limitadas em comparação com P-*space* Limitado

Propriedades	**P-*space* Aumentado Limitado**	**P-*space* Limitado Pedestres**	**P-*space* Aumentado Limitado Pedestres**
Número de vértices	0,0%	0,0%	0,0%
Número de arestas	+101,9%	+1,7%	+103,3%
Densidade	+101,9%	+1,7%	+103,3%
Grau Médio	+101,9%	+1,7%	+103,3%
Distância Média	-12,8%	-0,6%	-13,0%
Diâmetro	0,0%	0,0%	0,0%

Fonte: Elaboração Própria

A consideração dos deslocamentos realizados a pé entre os pontos de ônibus, com distância máxima de 400 m, não resultou em grandes mudanças na estrutura e características das redes analisadas. Isso pode ser observado ao comparar as propriedades das redes P-*space* Pedestres com P-*space* e P-*space* Limitado Pedestres com P-*space* Limitado. Esta análise comparativa permite verificar que todas as

propriedades obtidas variam pouco (no máximo cerca de 1,7%) ou permanecem as mesmas, como ocorre com o diâmetro.

Quanto às bicicletas compartilhadas, nota-se que todas as redes elaboradas utilizando essas bicicletas como alimentadoras dos ônibus tiveram um aumento no valor das propriedades analisadas, exceto no diâmetro que permaneceu igual para todas as oito redes geradas neste estudo e na distância média entre vértices que diminuiu. Isso significa que se pode alcançar um número maior de pontos de ônibus a partir de um ponto qualquer da cidade, sendo necessárias menos linhas de ônibus para se deslocar entre os pontos.

Além disso, é verificado que a componente gigante de todas as redes geradas neste estudo é composta por 100% de seus vértices, ou seja, todas as redes desenvolvidas são conexas. Portanto, é possível se deslocar entre todos os pontos de ônibus da cidade. Como o diâmetro da rede (maior distância entre os pontos de parada) é igual a 4, é necessário realizar no máximo 3 baldeações (utilizar até 4 linhas de ônibus) para se deslocar entre quaisquer pontos de ônibus na cidade do Rio de Janeiro.

Também foram obtidas as medidas de centralidade dos pontos de ônibus das oito redes geradas. A partir desses dados foi identificada a localização dos pontos de ônibus com os 25 maiores valores de centralidade de grau, intermediação e proximidade em cada uma dessas redes. Como existem pontos de ônibus que possuem o mesmo grau, ao analisar a centralidade de grau de algumas redes foram identificados mais de 25 pontos.

Foi verificado que nas redes completas a maioria dos pontos de ônibus mais centrais se concentra no Centro da cidade do Rio de Janeiro. Conforme pode ser observado nas figuras presentes no Apêndice A, que mostram a localização no mapa do Rio de Janeiro dos pontos de ônibus com os 25 maiores valores de centralidade de grau, intermediação e proximidade nas redes completas. Foi observado que a disposição desses pontos é muito parecida no P-*space* e P-*space* Aumentado e também no P-*space* Pedestres e P-*space* Aumentado Pedestres, ou seja, nessas redes a integração com as bicicletas compartilhadas não influencia muito nos valores das centralidades dos pontos.

Nas figuras contidas no Apêndice B é apresentada a localização no mapa do Rio de Janeiro dos pontos de ônibus com os 25 maiores valores de centralidade de grau, intermediação e proximidade nas redes limitadas. Nota-se que nessas redes a maioria dos pontos mais centrais se concentra no Centro da cidade do Rio de Janeiro. No

entanto, quando comparado com o P-*space* Limitado e P-*space* Limitado Pedestres, foi verificado que no P-*space* Aumentado Limitado e P-*space* Aumentado Limitado Pedestres há uma maior quantidade de pontos na zona sul da cidade do Rio de Janeiro, onde há um grande número de estações de bicicletas compartilhadas. Isso indica que nas redes limitadas a integração dessas bicicletas com os ônibus influencia mais nos valores das centralidades dos pontos do que nas redes completas.

Considerações Finais

O principal objetivo deste estudo consistia em analisar o impacto das bicicletas compartilhadas do *Bike* Rio na rede de ônibus da cidade do Rio de Janeiro, visto que o ônibus é o meio de transporte público mais utilizado nesta cidade. Esta análise foi realizada a partir da aplicação do modelo topológico P-*space* para representação da rede de ônibus da cidade. Neste trabalho foram geradas oito redes com base nesse modelo, sendo obtidas e comparadas as seguintes propriedades dessas redes: grau, distância, diâmetro, densidade e medidas de centralidade de grau, proximidade e intermediação.

Além da rede P-*space*, que conecta os pontos que possuem linhas de ônibus em comum, foi desenvolvida neste estudo a rede P-*space* Aumentado, que integra as bicicletas compartilhadas na rede de ônibus da cidade do Rio de Janeiro.

A análise dessas redes permitiu verificar que o grau médio, densidade e número de arestas aumentaram na mesma proporção do P-*space* para o P-*space* Aumentado, enquanto houve uma pequena diminuição da distância média. Isso significa que a utilização das bicicletas compartilhadas como alimentadoras dos ônibus da cidade do Rio de Janeiro torna a rede de ônibus da cidade mais conectada, sendo possível a partir de um determinado ponto de ônibus alcançar, em média, cerca de 513 pontos, representando um aumento em torno de 11% em relação ao P-*space*. Já a quantidade média de linhas de ônibus necessárias para se deslocar entre os pontos da cidade apresentou uma pequena redução.

Além dessas redes, neste trabalho também foram elaboradas outras variações do P-*space*, denominadas P-*space* Pedestres e P-*space* Aumentado Pedestres. Essas redes analisam os deslocamentos de até 400 m realizados a pé pelos pedestres entre pontos de ônibus para troca de linhas, tendo em vista que são necessárias, em média, duas linhas de ônibus para trafegar entre os pontos da cidade do Rio de Janeiro. Portanto, em muitas viagens de ônibus nesta cidade é preciso realizar baldeação e devido ao BRS é ainda mais frequente a necessidade de se deslocar entre pontos para embarcar em outra linha.

Ao comparar essas redes constatou-se que a variação dos valores de suas propriedades é muito semelhante à observada entre o P-*space* e o P-*space* Aumentado. No entanto, a comparação do P-*space* Pedestres com o P-*space* permitiu verificar que as

propriedades variaram pouco, no máximo cerca de 0,5%. Isso significa que as caminhadas de até 400 m realizadas pelos pedestres entre pontos de ônibus não geraram mudanças significativas nos valores das propriedades da rede.

Essas quatro redes são chamadas de redes completas, visto que representam a rede de ônibus de toda a cidade do Rio de Janeiro (com 6656 pontos e 377 linhas de ônibus), que é integrada com as 249 estações de bicicletas compartilhadas do *Bike* Rio nas redes P-*space* Aumentado e P-*space* Aumentado Pedestres.

A fim de realizar uma análise focada nos locais com maior concentração de estações de bicicletas compartilhadas na cidade, foram elaboradas as redes P-*space* Limitado, P-*space* Aumentado Limitado, P-*space* Limitado Pedestres e P-*space* Aumentado Limitado Pedestres. Essas redes limitadas foram desenvolvidas a partir da delimitação das regiões da cidade com maior quantidade de estações de bicicletas compartilhadas que originou duas áreas de interesse: área 1 (Barra da Tijuca e Recreio dos Bandeirantes) e área 2 (zona sul da cidade do Rio de Janeiro, Centro e parte da Tijuca e Maracanã), com 1300 pontos de ônibus e 242 estações de bicicletas compartilhadas.

A análise dessas redes limitadas indicou que, se houvesse estações de bicicletas compartilhadas distribuídas por toda cidade na mesma proporção que nessas áreas delimitadas, a utilização dessas bicicletas como alimentadoras dos ônibus tornaria a rede de ônibus da cidade mais conectada. Visto que nas redes limitadas as bicicletas proporcionam um aumento considerável no valor da maioria das propriedades obtidas, exceto da distância média, que diminuiu com a integração das bicicletas. Portanto, esta integração possibilita a conexão entre um maior número de pontos de ônibus, aumentando em mais de 100% o número de deslocamentos possíveis entre os pontos usando apenas uma linha de ônibus e diminuindo a quantidade média de linhas necessárias para ir de um ponto a outro da cidade.

Em todas as redes analisadas neste trabalho, a componente gigante possui 100% de seus vértices, ou seja, todas as redes geradas são conexas, sendo assim, possível se deslocar entre todos os pontos de ônibus da cidade. Como o diâmetro permaneceu o mesmo em todas essas redes, equivalente a 4, são necessárias no máximo 4 linhas de ônibus para se deslocar entre quaisquer pontos da cidade. No entanto, com 3 linhas já é possível trafegar entre mais de 99% dos pontos.

Outra propriedade que não variou muito foi a distância média, que se manteve com o valor em torno de 2 em todas as redes geradas, de modo que são necessárias, em média, 2 linhas de ônibus para se deslocar entre os pontos da cidade, sendo verificada uma tendência de diminuição dessa quantidade de linhas com o aumento do número de estações de bicicletas.

A partir da análise comparativa das redes geradas neste estudo pôde-se concluir que a integração das bicicletas compartilhadas com os ônibus da cidade do Rio de Janeiro proporciona mais opções de deslocamentos entre os pontos, torna a rede de ônibus da cidade mais conectada e reduz a quantidade de linhas de ônibus necessárias para trafegar entre pontos de ônibus.

Assim, nota-se que houve mudanças na rede de ônibus da cidade com a integração das bicicletas compartilhadas, mas essas alterações são mais significativas ao analisar apenas as regiões da cidade com maior concentração de estações de bicicletas. Ocorreram também variações dos valores das propriedades da rede de ônibus ao considerar as caminhadas realizadas pelos pedestres entre pontos, porém essas variações não foram muito expressivas, o que pode ser justificado pela presença de poucos corredores BRS na cidade e pelo valor estabelecido de distância máxima de deslocamento a pé entre pontos, equivalente a apenas 400 m.

Outra análise realizada foi a variação do valor dos parâmetros utilizados para gerar as redes neste estudo, sendo desenvolvidas 25 versões de cada uma das redes criadas a partir da integração das bicicletas compartilhadas. Assim, foi verificado que, quanto maior a distância máxima percorrida de bicicleta (entre suas estações) e a pé (entre pontos de ônibus e estações de bicicletas), maior será o grau médio, densidade e número de arestas da rede de ônibus, o mesmo não ocorre com a distância média, que diminui. Isso significa que o aumento desses trajetos tende a reduzir o número de linhas de ônibus necessárias para se deslocar entre os pontos. Além de aumentar a quantidade de deslocamentos possíveis entre os pontos, tornando a rede de ônibus mais coesa.

Dessa forma, conclui-se que com a implantação de mais estações de bicicletas compartilhadas, a cidade do Rio de Janeiro se tornaria mais conectada, facilitando o deslocamento da população dentro da cidade ao utilizar as bicicletas como alimentadoras dos ônibus, de modo a contribuir para a melhoria da mobilidade urbana da cidade como um todo.

Além de expandir o alcance dos ônibus, complementando seus trajetos, a utilização das bicicletas como meio de transporte contribui para a diminuição das emissões de gases poluentes e dos congestionamentos (ao desestimular o uso de automóveis). Também proporciona melhoria na qualidade de vida de seus usuários.

Como trabalhos futuros, sugere-se expandir o modelo desenvolvido neste estudo para que ele possa abranger os outros meios de transporte público do Rio de Janeiro, além dos ônibus, integrando todo o sistema de transporte público da cidade. Este modelo também poderia ser aplicado em outras cidades, incluindo as que possuem bicicletas elétricas em seus sistemas de compartilhamento de bicicletas.

Outra proposta seria analisar a integração das bicicletas compartilhadas na rede de ônibus considerando sua disponibilidade nas estações (quantidade de vagas ocupadas e vazias), tendo em vista que foi observada, com grande frequência, a ocorrência de estações de bicicletas vazias na cidade do Rio de Janeiro. Além disso, sugere-se também desenvolver um modelo para identificar os locais ideais para instalação das estações de bicicletas compartilhadas e estabelecer um padrão para redistribuição das bicicletas pelas estações.

Referências

ALTERKAWI, M. M. A computer simulation analysis for optimizing bus stops spacing: The case of Riyadh, Saudi Arabia. **Habitat International**, v. 30, n. 3, p. 500-508, 2006.

BARTHÉLEMY, M. Spatial networks. **Physics Reports**, v. 499, n. 1, p. 1-101, 2011.

BIKE RIO. **Mapa das estações**. Disponível em: <https://bikerio.tembici.com.br/>. Acesso em: 10 fev. 2017.

BIKE RIO. **Informações gerais**. Disponível em: <https://bikeitau.com.br/bikerio/>. Acesso em: 09 mar. 2018.

BRASIL. Lei nº 9.503, de 23 de setembro de 1997. **Institui o Código de Trânsito Brasileiro**. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/Ccivil_03/leis/L9503.htm>. Acesso em: 02 mar. 2018

BRASIL. Lei nº 12.587, de 3 de janeiro de 2012. **Institui as diretrizes da Política Nacional de Mobilidade Urbana**. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/l12587.htm>. Acesso em: 24 jan. 2018

BOARETO, R. A política de mobilidade urbana e a construção de cidades sustentáveis. **Revista dos Transportes Públicos - ANTP**, Ano 30/31, p. 143-160, 2008.

CHEN, Y. Z.; LI, N.; HE, D. R. A study on some urban bus transport networks. **Physica A: Statistical Mechanics and its Applications**, v. 376, p. 747-754, 2007.

DA SILVA, A. N. R.; COSTA, M. S.; MACEDO, M. H. Multiple views of sustainable urban mobility: The case of Brazil. **Transport Policy**, v. 15, n. 6, p. 350-360, 2008.

DATA RIO - PORTAL DE DADOS ABERTOS DA PREFEITURA DO RIO DE JANEIRO. **Pontos de parada das linhas de ônibus.** 2016. Disponível em: <http://data.rio/dataset?groups=transporte-e-mobilidade>. Acesso em: 10 fev. 2017.

DATA RIO - PORTAL DE DADOS ABERTOS DA PREFEITURA DO RIO DE JANEIRO. **Evolução da extensão de ciclovias**. Disponível em: <http://www.data.rio/datasets/ad12e885a28148cdbddc146e6ca770c7>. Acesso em: 05 nov. 2017a.

DATA RIO - PORTAL DE DADOS ABERTOS DA PREFEITURA DO RIO DE JANEIRO. **Movimento médio diário de passageiros**. Disponível em: <http://www.data.rio/datasets/ff2eab53197f47db80759a3d3e2308c3>. Acesso em: 05 nov. 2017b.

DATA RIO - PORTAL DE DADOS ABERTOS DA PREFEITURA DO RIO DE JANEIRO. **Rede Cicloviária**. Disponível em: <http://www.data.rio/datasets/rede-ciclovi%C3%A1ria-visualiza%C3%A7%C3%A3o>. Acesso em: 05 nov. 2017c.

DATA RIO - PORTAL DE DADOS ABERTOS DA PREFEITURA DO RIO DE JANEIRO. **Transporte terrestre**. Disponível em: <http://www.data.rio/pages/rio-em-sntese-2>. Acesso em: 05 nov. 2017d.

DE ARAÚJO, M. R. M.; DE OLIVEIRA, J. M.; DE JESUS, M. S.; DE SÁ, N. R.; DOS SANTOS, P. A. C.; LIMA, T. C. Transporte público coletivo: discutindo acessibilidade, mobilidade e qualidade de vida. **Revista Psicologia & Sociedade**, v. 23, n. 3, 2012.

DE BONA, A. A.; FONSECA, K. V. O.; ROSA, M. O.; LÜDERS, R.; DELGADO, M. R. B. S. Analysis of Public Bus Transportation of a Brazilian City Based on the Theory of Complex Networks Using the P-Space. **Mathematical Problems in Engineering**, v. 2016, 2016.

DE NOOY, W.; MRVAR, A.; BATAGELJ, V. **Exploratory social network analysis with Pajek.** New York: Cambridge University Press, 2005.

DEMAIO, P. Bike-sharing: History, impacts, models of provision, and future. **Journal of Public Transportation**, v. 12, n. 4, p. 3, 2009.

DILL, J.; VOROS, K. Factors affecting bicycling demand: initial survey findings from the Portland, Oregon, region. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, n. 2031, p. 9-17, 2007.

DIMITROV, S. D.; CEDER, A. A. A method of examining the structure and topological properties of public-transport networks. **Physica A: Statistical Mechanics and its Applications**, v. 451, p. 373-387, 2016.

FENG, S.; HU, B.; NIE, C.; SHEN, X. Empirical study on a directed and weighted bus transport network in China. **Physica A: Statistical Mechanics and its Applications**, v. 441, p. 85-92, 2016.

FETRANSPOR – FEDERAÇÃO DAS EMPRESAS DE TRANSPORTES DE PASSAGEIROS DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO. **Mobilidade Urbana - Projetos**. Disponível em: <http://www.fetranspor.com.br/a-fetranspor-sobre-a-fetranspor>. Acesso em: 02 abr. 2018

FISHMAN, E. Bikeshare: A review of recent literature. **Transport Reviews**, v. 36, n. 1, p. 92-113, 2016.

FISHMAN, E.; WASHINGTON, S.; HAWORTH, N. Bike share: a synthesis of the literature. **Transport Reviews**, v. 33, n. 2, p. 148-165, 2013.

FISHMAN, E.; WASHINGTON, S.; HAWORTH, N.; MAZZEI, A. Barriers to bikesharing: an analysis from Melbourne and Brisbane. **Journal of Transport Geography**, v. 41, p. 325-337, 2014.

GARCÍA-PALOMARES, J. C.; GUTIÉRREZ, J.; LATORRE, M. Optimizing the location of stations in bike-sharing programs: a GIS approach. **Applied Geography**, v. 35, n. 1, p. 235-246, 2012.

GEBHART, K.; NOLAND, R. B. The impact of weather conditions on bikeshare trips in Washington, DC. **Transportation**, v. 41, n. 6, p. 1205-1225, 2014.

GOOGLE MAPS. Google. **Rio de Janeiro**. Disponível em: <https://www.google.com/maps/place/Rio+de+Janeiro,+RJ,+Brasil/@-22.9028569,-43.1876642,1791m/data=!3m1!1e3!4m5!3m4!1s0x9bde559108a05b:0x50dc426c672fd24e!8m2!3d-22.9068467!4d-43.1728965>. Acesso em: 10 jun. 2017.

GOOGLE FUSION TABLES. Google. Disponível em: <https://fusiontables.google.com>. Acesso em: 10 jun. 2017.

GÖSSLING, S. Urban transport transitions: Copenhagen, city of cyclists. **Journal of Transport Geography**, v. 33, p. 196-206, 2013.

HEINEN, E.; VAN WEE, B.; MAAT, K. Commuting by bicycle: an overview of the literature. **Transport reviews**, v. 30, n. 1, p. 59-96, 2010.

HU, S. R.; LIU, C. T. An optimal location model for a bicycle sharing program with truck dispatching consideration. In: **Intelligent Transportation Systems (ITSC), 2014 IEEE 17th International Conference on**. IEEE, 2014. p. 1775-1780.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Panorama da cidade do Rio de Janeiro**. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/rj/rio-de-janeiro/panorama>. Acesso em: 03 nov. 2017.

LANGFORD, B.; CHERRY, C.; YOON, T.; WORLEY, S.; SMITH, D. North America's First E-Bikeshare: A Year of Experience. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, n. 2387, p. 120-128, 2013.

LI, Z. W.; ZHU, M. Breadth-first search based bus transport transfer algorithm. In: **Proceedings of the 9th WSEAS Int. Conference Applied Computer and Applied Computational Science**. 2010.

LIN, J.; BAN, Y. Complex network topology of transportation systems. **Transport Reviews**, v. 33, n. 6, p. 658-685, 2013.

LIN, J. R.; YANG, T. H.. Strategic design of public bicycle sharing systems with service level constraints. **Transportation research part E: logistics and transportation review**, v. 47, n. 2, p. 284-294, 2011.

LU, H.; SHI, Y. Complexity of public transport networks. **Tsinghua Science & Technology**, v. 12, n. 2, p. 204-213, 2007.

MAGAGNIN, R. C.; DA SILVA, A. N. R. A percepção do especialista sobre o tema mobilidade urbana. **Transportes**, v. 16, n. 1, 2008.

MARTENS, K. Promoting bike-and-ride: The Dutch experience. **Transportation Research Part A: Policy and Practice**, v. 41, n. 4, p. 326-338, 2007.

MORITZ, W. Survey of North American bicycle commuters: design and aggregate results. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, n. 1578, p. 91-101, 1997.

NEWMAN, M. E. The structure and function of complex networks. **SIAM review**, v. 45, n. 2, p. 167-256, 2003.

NEWMAN, M. E. J. The structure of scientific collaboration networks. **Proceedings of the national academy of sciences**, v. 98, n. 2, p. 404-409, 2001.

O'BRIEN, O.; CHESHIRE, J.; BATTY, M. Mining bicycle sharing data for generating insights into sustainable transport systems. **Journal of Transport Geography**, v. 34, p. 262-273, 2014.

PERO, V.; MIHESSEN, V. Mobilidade urbana e pobreza no Rio de Janeiro. **Revista Econômica**, v. 15, n. 2, 2013.

PMUS - PLANO DE MOBILIDADE URBANA SUSTENTÁVEL. **Diagnóstico - Volume II: Caracterização dos deslocamentos e componentes do sistema de mobilidade.** 2015. Disponível em: <http://www.rio.rj.gov.br/web/pmus/documentos>. Acesso em: 05 mar. 2018

PREFEITURA DA CIDADE DO RIO DE JANEIRO. **Bike Rio**. Disponível em: <http://prefeitura.rio/web/smf/exibeconteudo?id=7195065>. Acesso em: 03 nov. 2017.

PREFEITURA DA CIDADE DO RIO DE JANEIRO. **Conceito do Programa Rio Conecta**. Disponível em: <http://prefeitura.rio/web/smu/exibeconteudo?id=7301546>. Acesso em: 10 mar. 2018a.

PREFEITURA DA CIDADE DO RIO DE JANEIRO. **Plano de Mobilidade Urbana Sustentável (PMUS)**. Disponível em: <http://www.rio.rj.gov.br/web/pmus/sobre>. Acesso em: 05 mar. 2018b.

PREFEITURA DA CIDADE DO RIO DE JANEIRO. **Transparência da Mobilidade**. Disponível em: <http://www.rio.rj.gov.br/web/transparenciadamobilidade>. Acesso em: 02 abr. 2018c

RICCI, M. Bike sharing: A review of evidence on impacts and processes of implementation and operation. **Research in Transportation Business & Management**, v. 15, p. 28-38, 2015.

SHAHEEN, S.; GUZMAN, S.; ZHANG, H. Bikesharing in Europe, the Americas, and Asia: past, present, and future. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, n. 2143, p. 159-167, 2010.

SIENKIEWICZ, J.; HOŁYST, J. A. Statistical analysis of 22 public transport networks in Poland. **Physical Review E**, v. 72, n. 4, p. 046127, 2005.

SVENSON, P. Complex networks and social network analysis in information fusion. In: **Information Fusion, 2006 9th International Conference on**. IEEE, 2006. p. 1-7.

VOGEL, M.; HAMON, R.; LOZENGUEZ, G.; MERCHEZ, L.; ABRY, P.; BARNIER, J.; BORGNAT, P.; FLANDRIN, P.; MALLON, I.; ROBARDET, C. From bicycle sharing system movements to users: a typology of Vélo'v cyclists in Lyon based on large-scale behavioural dataset. **Journal of Transport Geography**, v. 41, p. 280-291, 2014.

VON FERBER, C.; HOLOVATCH, T.; HOLOVATCH, Y.; PALCHYKOV, V. Public transport networks: empirical analysis and modeling. **The European Physical Journal B-Condensed Matter and Complex Systems**, v. 68, n. 2, p. 261-275, 2009.

WANG, F. J.; RUAN, S. B. The Homogeneity Research of Urban Rail Transit Network Performance. In: **MATEC Web of Conferences**. EDP Sciences, 2016. p. 01003.

WASSERMAN, S.; FAUST, K. **Social network analysis: Methods and applications**. Cambridge: Cambridge University Press, 1994.

XU, Q.; ZU, Z.; XU, Z.; ZHANG, W.; ZHENG, T. Space P-based empirical research on public transport complex networks in 330 cities of China. **Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology**, v. 13, n. 1, p. 193-198, 2013.

XU, X.; HU, J.; LIU, F.; LIU, L. Scaling and correlations in three bus-transport networks of China. **Physica A: Statistical Mechanics and its Applications**, v. 374, n. 1, p. 441-448, 2007.

YANG, X. H.; WANG, B.; CHEN, S. Y.; WANG, W. L. Epidemic dynamics behavior in some bus transport networks. **Physica A: Statistical Mechanics and its Applications**, v. 391, n. 3, p. 917-924, 2012.

ZHAO, J.; DENG, W.; SONG, Y. Ridership and effectiveness of bikesharing: The effects of urban features and system characteristics on daily use and turnover rate of public bikes in China. **Transport Policy**, v. 35, p. 253-264, 2014.

Apêndice A – Mapa com os pontos de ônibus com os maiores valores de centralidade nas redes completas



Figura 53 - Pontos de ônibus no P-*space* e P-*space* Aumentado com maiores valores de centralidade. (a) Intermediação. (b) Grau. (c) Proximidade
Fonte: Dados cartográficos do *Google Fusion Tables* (2017)



Figura 54 - Pontos de ônibus no P-*space* Pedestres e P-*space* Aumentado Pedestres com maiores valores de centralidade. (a) Intermediação. (b) Grau. (c) Proximidade
Fonte: Dados cartográficos do *Google Fusion Tables* (2017)

Apêndice B – Mapa com os pontos de ônibus com os maiores valores de centralidade nas redes limitadas

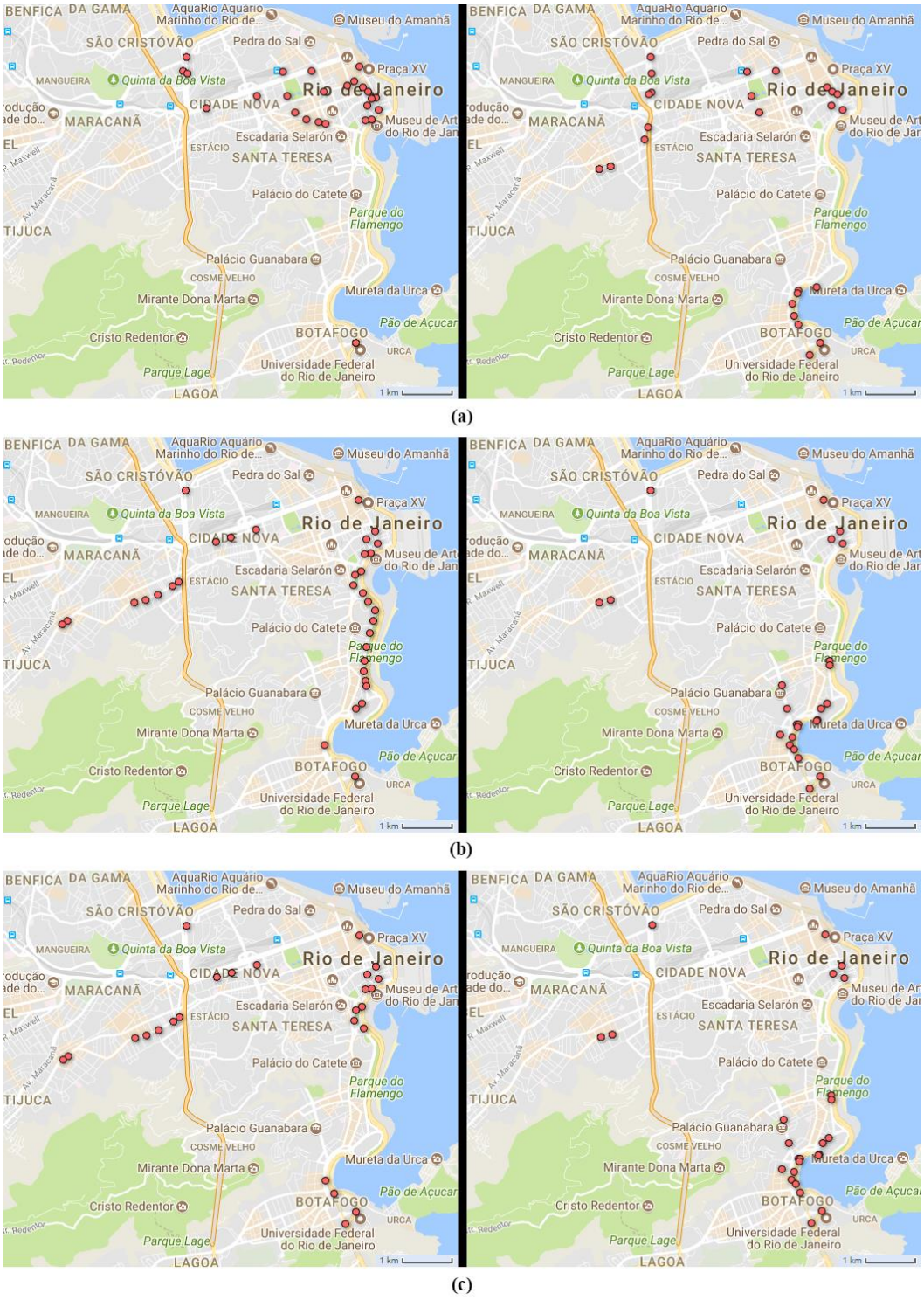


Figura 55 - Pontos de ônibus no P-*space* Limitado e P-*space* Aumentado Limitado com maiores valores de centralidade. (a) Intermediação. (b) Grau. (c) Proximidade
Fonte: Dados cartográficos do *Google Fusion Tables* (2017)



Figura 56 - Pontos de ônibus no P-*space* Limitado Pedestres e P-*space* Aumentado Limitado Pedestres com maiores valores de centralidade. (a) Intermediação. (b) Grau. (c) Proximidade
Fonte: Dados cartográficos do *Google Fusion Tables* (2017)