

EDSON HILIOS MARQUES NUNES

**Estimativa da ocupação utilizando sensoriamento Wi-Fi de telefones móveis:
Uma aplicação no transporte público urbano de passageiros por ônibus**

São Paulo
2018

EDSON HILIOS MARQUES NUNES

**Estimativa da ocupação utilizando sensoriamento Wi-Fi de telefones móveis:
Uma aplicação no transporte público urbano de passageiros por ônibus**

Versão Original

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Área de Concentração: Engenharia de Transportes.

Orientador: Prof.º Dr. Claudio Luiz Marte

São Paulo

2018

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Catálogo-na-publicação

Nunes, Edson Hilios Marques

Estimativa da ocupação utilizando sensoriamento Wi-Fi de telefones móveis: Uma aplicação no transporte público urbano de passageiros por ônibus / E. H. M. Nunes -- São Paulo, 2018.

93 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Transportes.

1. Transportes 2. Transporte Público 3. Ônibus 4. Sistemas Inteligentes de Transportes 5. Contador Automático de Passageiros I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Transportes II. t.

Nome: NUNES, Edson Hilios Marques

Título: Estimativa da ocupação utilizando sensoriamento Wi-Fi de telefones móveis:
Uma aplicação no transporte público urbano de passageiros por ônibus

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para
obtenção do título de Mestre em Ciências.

Aprovado em:

Prof. Dr. _____

Instituição _____

Julgamento _____

Prof. Dr. _____

Instituição _____

Julgamento _____

Prof. Dr. _____

Instituição _____

Julgamento _____

AGRADECIMENTOS

Ao Prof.º Dr. Claudio Luiz Marte pelo apoio e motivação, pelos ensinamentos compartilhados, paciência e por acreditar em minha ideia.

Ao departamento de Engenharia de Transporte da Escola Politécnica de Universidade de São Paulo, pela oportunidade de realização do curso de mestrado.

Aos colegas de mestrado Claudio de Senna Frederico e Arnaldo Luís Santos Pereira, que dividiram tão prontamente suas experiências profissionais sobre a operação e gestão do transporte público.

Aos demais professores da Escola Politécnica, em especial da Engenharia de Transportes, que durante as aulas e conversas estimularam o senso crítico e introduziram muito dos assuntos abordados neste trabalho.

A equipe do OpenStreetMaps por disponibilizar o banco de dados com informações geográficas da cidade de São Paulo.

“O primeiro princípio é que você não deve enganar a si mesmo – e você é a pessoa mais fácil de se enganar.”
(FEYNMAN, 1974, p. 12).

RESUMO

NUNES, Edson Hilios Marques. **Estimativa da ocupação utilizando sensoriamento Wi-Fi de telefones móveis: Uma aplicação no transporte público urbano de passageiros por ônibus.** 2018. 93 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018.

A lotação do veículo é um dos fatores determinantes para a qualidade do transporte público (TP), pois, além do conforto do passageiro, afeta também a confiabilidade da linha, alterando a velocidade média do veículo. Entretanto, na cidade de São Paulo, Brasil, uma das maiores operações de ônibus do mundo, é difícil se encontrar implantado algum equipamento de contagem automática de passageiros (APC), provavelmente devido aos custos das tecnologias atuais. Esta pesquisa apresenta os resultados de um método de APC utilizando o sensoriamento por Wi-Fi de telefones móveis dos passageiros embarcados num veículo do TP por ônibus. Para este fim, um protótipo de baixo custo foi desenvolvido e instalado na linha 6500-10 entre o Terminal Santo Amaro e o Terminal Bandeira, durante 7 dias da semana em horários de pico e entre pico. Os dados coletados foram analisados através de ferramentas estatísticas e métodos de análise geográficas. Durante o experimento observou-se que o APC foi capaz de detectar a mudança da ocupação do veículo em 85% dos casos, com uma confiança de até 20% e um erro de até 22 passageiros por medida. Através de dados de posição geográfica foi possível gerar matrizes de carregamento, que permitem inferir a origem e o destino dos passageiros em cada viagem, assim como – para todo o período do experimento – indicar os trechos com maior lotação. Por outro lado, o método não apresentou bons resultados saindo dos terminais e quando a ocupação mudou repentinamente, requerendo estudos posteriores para refinar o algoritmo apresentado. Da mesma maneira, ainda não há como generalizar o método para toda operação, pois, o espaço amostral estudado foi pequeno, deixando como sugestão para pesquisas futuras o aprimoramento deste sistema.

Palavras-chave: Transporte Público. Ônibus. Sistemas Inteligentes de Transportes. Contador Automático de Passageiros. Sensoriamento por Wi-Fi.

ABSTRACT

NUNES, Edson Hilios Marques. **Estimating the occupancy using Wi-Fi sensing of mobile phones: An application on the urban public transportation by bus.** 2018. 93 p. Dissertation (Master in Transportation Engineering) – Escola Politécnica, University of São Paulo, São Paulo, 2018.

The crowdedness of a vehicle is one of the main quality factor of the public transportation (TP) quality, since, besides the comfort, also affect the reliability of the line, changing its average speed. However, the city of São Paulo, Brazil, one of the biggest bus operations of the world, it is difficult to find any automatic passenger counter (APC) equipment deployed, probably due the costs of current technologies. This research shows the results of an APC technology by the sensing of the Wi-Fi signal of smartphones that are boarded in a vehicle on TP by bus. Therefore, a prototype was developed and deployed on the line 6500-10 between the Terminal Santo Amaro and the Terminal Bandeira, during 7 working days of the week on peak and off-peak hours. was analyzed with statistical and geographical tools. During the experiment, it was observed that the Wi-Fi APC was capable of estimate the occupancy of the vehicle 85% of the cases, with a significance level up to 20% and an error up to 22 passengers per estimation. Through the geographical analysis it was generated load matrices, that allow to infer the origin and destination of the passenger in each trip, indicating the sections along the route where were more boarding and alighting. On the other hand, the method did not perform well when coming out of the final stops and when the crowdedness changed suddenly, requiring further analysis to understand how to deal better under these circumstances. Likewise, due to the limited sample utilized in this research, we cannot generalize the results presented, pressing the need for new researches on different operation scenarios.

Keyword: Public Transportation. Bus. Intelligent Transportation Systems. Automatic Passengers Counter. Wi-Fi Sensing.

LISTA DE IMAGENS

Figura 1 – Veículo biarticulado, com 28 metros e capacidade para 270 passageiros do sistema BRT de Curitiba.....	34
Figura 2 – Representação gráfica dos canais da frequência 2.4 GHz.....	46
Figura 3 – Etapas do processo de conexão em uma rede Wi-Fi.....	47
Figura 4 – Estrutura de um endereço MAC-48	47
Figura 5 – Vista superior do protótipo com a Raspberry Pi, antena Wi-Fi e bateria externa	51
Figura 6 – Versão final do protótipo do contador automático de passageiros.....	52
Figura 7 – Diagrama dos componentes que compõe o protótipo.....	53
Figura 8 – Classificação da ocupação do carro através da densidade de pessoas	55
Figura 9 – Fluxograma das etapas do algoritmo de estimativa da ocupação.....	59
Figura 10 – Mapa de trajetória classificados pela ocupação do veículo	74
Figura 11 – Mapa de densidade da matriz de origem e destino do sensor Wi-Fi.....	77

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Percentual das pessoas que tinham telefone móvel celular para uso pessoal por grupo de idade de 2011 até 2015	29
Gráfico 2 – Contagem simples de dispositivos móveis durante uma corrida.....	58
Gráfico 3 – Proporção dos avistamentos por fabricantes de telefones móveis	68
Gráfico 4 – Comparação entre os dados observados pelo Wi-Fi com os esperados pela pesquisa visual.....	69
Gráfico 5 – Análise de variância dos limiares do número de passageiros.....	70
Gráfico 6 – Cálculo da ocupação pelo sensor Wi-Fi incluindo as medições antes do início da viagem	73
Gráfico 7 – Diagrama de caixa do efeito do nível de ocupação do veículo na sua velocidade durante todas as viagens realizadas.	76

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Escala de classificação da ocupação de um veículo	31
Tabela 2 – Atributos de qualidade do transporte público.....	35
Tabela 3 – Descrição do custo dos componentes do protótipo de APC	53
Tabela 4 – Escala de classificação da ocupação de um veículo e sua definição	55
Tabela 5 – Planilha de horários em que o experimento foi executado.....	57
Tabela 6 – Mapeamento dos níveis de ocupação de pesquisa visual com a saída do algoritmo	61
Tabela 7 – Teste χ^2 de aderência dos dados observados e esperados para cada viagem	71

LISTA DE ABREVIações E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AFC	<i>Automatic Fare Collection</i>
APC	<i>Automatic Passenger Counter</i>
AVL	<i>Automatic Vehicle Location</i>
BRT	<i>Bus Rapid Transit</i>
CCTV	<i>Closed-Circuit Television</i>
ERB	Estação Radio Base
GNSS	<i>Global Navigation Satellite System</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
GSM	<i>Global System for Mobile Communication</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
MAC	<i>Media Access Control</i>
NFC	<i>Near Field Communication</i>
OD	Origem e Destino
OLED	<i>Organic Light-Emitting Diode</i>
OUI	<i>Organizationally Unique Identifier</i>
OSS	<i>Open Source Software</i>
IR	<i>Infrared Radiation</i>
ITS	<i>Intelligent Transportation System</i>
PNAD	Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílio
PR	<i>Probe Request</i>
RFID	<i>Radio-Frequency Identification</i>
SIG	Sistema de Informação Geográfica
SO	Sistema Operacional
SPTrans	São Paulo Transportes S.A.
SQL	<i>Structured Query Language</i>
TP	Transporte Público
WPS	<i>Wi-Fi Positioning System</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

m	Metros
km	Quilômetros
H_0	Hipótese nula
H_1	Hipótese alternativa
kg	Quilogramas
\$	Dólares americanos
GHz	Gigahertz
h	Horas
min	Minutos
seg	Segundos
R\$	Reais brasileiros
km/h	Quilômetros por hora
θ	Estimador da variância
α	Nível de significância
χ^2	Qui quadrado

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	25
1.1	OBJETIVOS	27
1.1.1	Objetivo geral	27
1.1.2	Objetivos específicos	27
1.2	JUSTIFICATIVA.....	27
1.3	METODOLOGIA.....	30
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO	32
2	REVISÃO LITERÁRIA	33
2.1	TRANSPORTE PÚBLICO POR ÔNIBUS	33
2.2	PARÂMETROS DE QUALIDADE NO TRANSPORTE PÚBLICO.....	34
2.3	SISTEMAS INTELIGENTES DE TRANSPORTE	37
2.3.1	Contagem automática de passageiros	38
2.3.1.1	Por sensores infravermelhos	38
2.3.1.2	Por sensores de peso	39
2.3.1.3	Por processamento de imagens.....	39
2.4	SENSORIAMENTO ATRAVÉS DE RADIOFREQUÊNCIAS.....	40
2.4.1	Método pela rede de telefonia celular	41
2.4.2	Método por Bluetooth	42
2.4.3	Método por Wi-Fi	43
2.5	PROTOCOLO DE COMUNICAÇÃO SEM FIO IEEE 802.11.....	45
2.6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	48
3	DESCRIÇÃO DO MÉTODO	51
3.1	HARDWARE.....	51
3.2	SOFTWARE	53
3.3	COLETA DE DADOS.....	54
3.4	PERÍODO DE COLETA	57
3.5	ALGORITMO DE ESTIMATIVA DA OCUPAÇÃO.....	58
3.5.1	Filtro de telefones móveis	60
3.5.2	Agrupamento e aplicação do limiar mínimo	60
3.5.3	Contagem de passageiros e cálculo da ocupação do veículo	61

3.6	DEFINIÇÃO DAS VÁRIAVEIS.....	62
3.7	ANÁLISE DO EXPERIMENTO.....	63
3.8	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	64
4	ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	67
4.1	VALIDAÇÃO DA AMOSTRA.....	67
4.2	ACURÁCIA DO ALGORITMO.....	68
4.2.1	Análise de variância.....	69
4.2.2	Análise de aderência.....	71
4.3	ANÁLISE GEOGRÁFICA.....	74
4.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	78
5	CONCLUSÃO.....	81
5.1	PESQUISAS FUTURAS.....	83
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	85
	ANEXO A – Formulário de pesquisa visual da ocupação.....	93

1 INTRODUÇÃO

O serviço de ônibus do Transporte Público (TP) conta com um conjunto de tecnologias bem estabelecidas para controle da operação: sistema de navegação global via satélite (*Global Navigation Satellites system*, GNSS) para posicionamento do veículo em tempo real; SmartCards com identificação por radiofrequência (*Radio-Frequency Identification*, RFID) para tarifação automática da passagem; e conectividade através da rede de telefonia celular para tráfego dos dados coletados.

Contudo, não se encontra o mesmo cenário quanto à informação da ocupação dos veículos, especialmente em operações que não contam com o sistema de entrada *check-in* e *check-out* para tarifação por distância percorrida (BARABINO; DI FRANCESCO; MOZZONI, 2014). Um efeito deste comportamento se dá nas equações utilizadas no planejamento do TP, que consideram como constantes a taxa de passageiros por hora e taxa de embarque, com o objetivo de minimizar o custo e obter o melhor equilíbrio entre oferta e demanda (JARA-DÍAZ; GSCHWENDER, 2003).

São ignoradas as flutuações naturais do volume de passageiros, que acarretam o excesso de lotação, dada a natureza estocástica dessa variável. Essa simplificação é aceita, visto que é economicamente inviável manter uma operação exclusiva para situações de pico, apesar de haver estratégias que buscam otimizar a utilização da frota para os diferentes fluxos de pessoas, como informam Haywood e Koning (2015).

O problema é que o aumento repentino e desordenado da demanda nos horários de pico, afeta todo o entorno urbano, causando o aumento de congestionamentos e aglomeração de pessoas, como alegam Tirachini, Hensher e Rose (2013). Os autores ainda indicam que, no TP ocorre uma diminuição de performance, em indicadores como: velocidade média; tempo de embarque e desembarque; tempo total de viagem; custo da operação; e o conforto percebido durante o deslocamento.

Some-se a isso, que o desconforto associado à alta lotação de um veículo está entre os maiores responsáveis pelo estresse entre os passageiros, superando os atrasos e o tempo de viagem, como relata Cantwell, Caulfield e O'Mahony (2009). Vê-se que o impacto do sobrecarregamento vai além da operação, interferindo também na qualidade de vida das pessoas.

Para se buscar mitigar os efeitos da lotação é necessário dispor de um sistema de contagem automático de passageiros (*Automatic Passengers Counters*, APC) que comunica, em tempo real, a ocupação dos veículos, afirmam Laskaris, et al. (2016).

A informação da ocupação, segundo Bouman, et al. (2016), possibilita aos operadores do TP aplicar estratégias de contingência, tais como: pular determinadas paradas ou aumentar a frequência de saída dos ônibus nas estações terminais. Da mesma forma, dá aos passageiros condições de escolher o melhor trajeto, considerando suas próprias necessidade de conforto e duração da viagem. Auxiliando uma melhor distribuição da ocupação, pois, espera-se que alguns usuários buscarão rotas alternativas.

Os principais métodos de APC encontrados na literatura são: através de reconhecimento de imagem, sensores infravermelhos nas portas e sensores baseados em peso do veículo (CUI, 2006). Apesar da possibilidade de utilizar diversas tecnologias, não é comum vê-las aplicadas no dia-a-dia da operação. De acordo com Barbino, Di Francesco e Mozzoni (2014), isto é devido a seu alto custo de implantação e manutenção, além, da dificuldade de processar as informações coletadas, geralmente associadas a softwares e hardwares proprietários.

Sob outra perspectiva, os telefones celulares têm sido utilizados para monitorar a movimentação de pessoas através dos sinais de radiofrequência (RF) que eles emitem. Esse sinal é emanado pelo simples ato de portar ou utilizar o dispositivo móvel, possibilitando sua identificação e localização ao longo do tempo.

A principal vantagem da RF, é que ela possui um baixo custo de aquisição, quando comparada com os outros métodos de APC descritos anteriormente. Além de produzir dados com uma frequência maior, ou seja, possibilitar um maior volume de aquisição de dados, estes podem ser e extrapolados para grande parcela da população, ainda que, a RF apresente um grau de confiabilidade mais baixo, quando comparado aos APCs (CALABRESE et al., 2011).

Diante da característica de poder aplicar o sensoriamento por telefones móveis com uma regularidade maior, sua utilização, no TP, ajuda a substituir as dispendiosas pesquisas de Origem e Destino (OD), normalmente utilizadas na fase de planejamento e validação da operação (ORTÚZAR; WILLUMSEN, 2011).

Apesar disso, tais tecnologias ainda não estão sendo largamente empregadas, pressupondo que o tema ainda precisa de mais pesquisas e divulgação de resultados. Finalmente, o grande desafio dos sistemas dos de sistema inteligentes de transporte (*Intelligent Transportation Systems, ITS*) é explorar o seu potencial, buscando não só a sua adoção, mas a sua integração com os usuários finais, visando extrair todo seu potencial (MARTE et al., 2012). Portanto, este trabalho se propõe a dar insumo à pesquisa da estimativa da lotação de ônibus do TP.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

O objetivo geral é propor um método de contagem automática de passageiros, para estimar a ocupação do ônibus, durante o seu trajeto, através do sensoriamento do sinal Wi-Fi emitido por dispositivos móveis.

1.1.2 Objetivos específicos

Pretende-se alcançar o objetivo geral através dos seguintes objetivos específicos:

- A) construir um protótipo do sensor, de baixo custo, capaz de capturar o sinal Wi-Fi emitido por telefones celulares;
- B) elaborar um algoritmo de tratamento dos dados capturados para estimar a ocupação do veículo em um determinado local e tempo;
- C) testar estatisticamente a eficiência do algoritmo, aplicando-o num experimento de campo feito na cidade de São Paulo, Brasil; e
- D) produzir mapas de Origem e Destino através da mudança de ocupação durante o trajeto da linha;

1.2 JUSTIFICATIVA

Diversos sistemas de informação disponibilizam informações, em tempo real, sobre as condições de tráfego e comutação nos centros urbanos. Um exemplo são os

aplicativos para celulares Waze¹, o Olho Vivo² e o Moovit³. O primeiro contém dados atualizados sobre o tráfego da região, e o segundo sobre os horários, localização e velocidade dos ônibus da cidade de São Paulo, além de informar as paradas mais próximas e o terceiro integra os dados das operadoras de TP com dados de usuários para ajudar a planejar a melhor viagem.

Caragliu, Del Bo e Nijkamp (2009) sustentam que o acesso instantâneo a informações sobre as condições dos centros urbanos, é o caminho sustentável para o desenvolvimento das cidades, que historicamente abrigam cada vez mais habitantes. Os autores ainda identificam a mobilidade urbana e o acesso ao TP como um dos eixos principais para o bem-estar dos cidadãos, fomentando a ideia de cidades inteligentes.

A expansão da internet, meios de comunicação sem fio e dispositivos móveis, tiveram um papel importante neste comportamento. Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) na última Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílio (PNAD), houve um aumento constante do percentual de pessoas que possuíam um telefone celular para uso pessoal no Brasil ao longo dos anos, observado através do Gráfico 1 (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, 2016). Em 2015, havia um total de 85,96% de pessoas com mais 15 anos com aparelhos móveis. Da mesma forma, a proporção de internautas também tem aumentado, passando para 57,5% de todos os residentes (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, 2016).

Entretanto, deste total nem todos os aparelhos possuem suporte a todas as tecnologias de RF além do sistema global de comunicação móvel (*Global System for Mobile communication*, GSM). Conhecidos como *smartphones*, são os aparelhos que permitem mais que apenas chamadas de voz, como acessar a internet, a execução de aplicativos e também contam com outros protocolos de comunicação sem fio como Wi-Fi e Bluetooth (HARA et al., 2017).

Em uma pesquisa de mercado realizada pelo Google (2017), esta revela que no Brasil, 67% do total de aparelhos móveis são *smartphones*. Outra análise revelada na

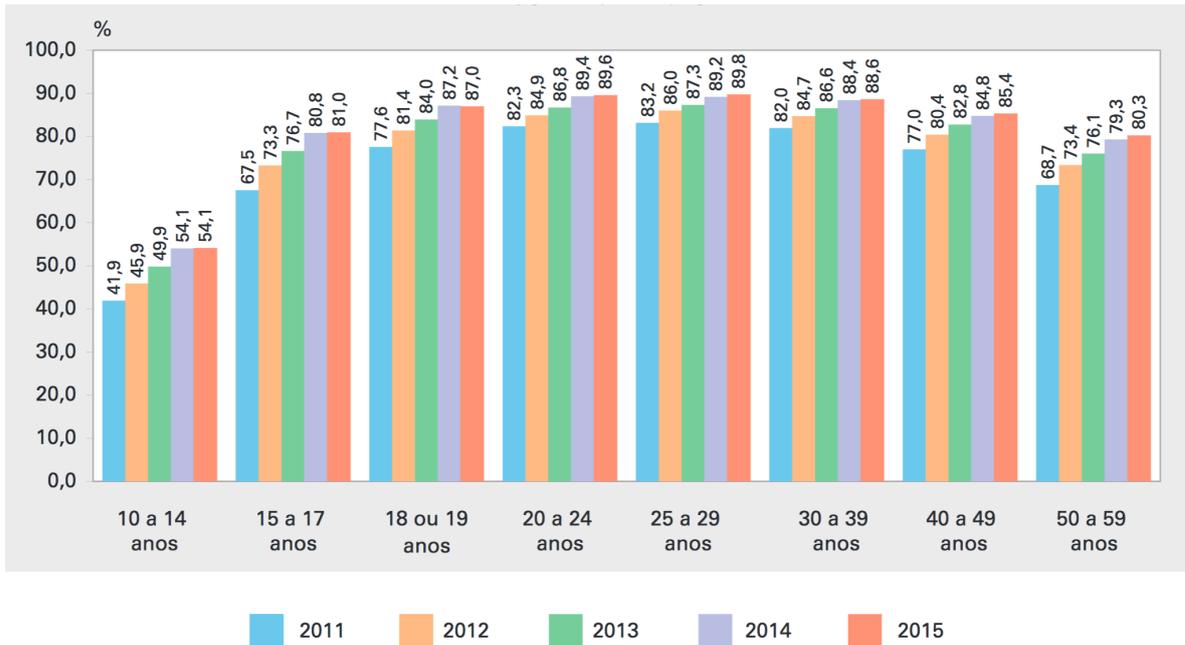
¹ Aplicativo de navegação do Google, com informações do tráfego em tempo real via *crowdsourcing*.

² Aplicativo da SPTrans com informações em tempo real dos horários dos ônibus.

³ Aplicativo desenvolvido pela Moovit Inc. para planejar viagens por TP através de dados das operadoras e de *crowdsourcing*.

29ª Pesquisa Anual do Uso de TI (FUNDAÇÃO GETULIO VARGAS, 2018), indica que provavelmente o número de telefones celulares irá se manter constante nos próximos anos, enquanto, se espera que o número de *smartphones* aumentem devido a troca de aparelhos antigos por modelos mais novos.

Gráfico 1 – Percentual das pessoas que tinham telefone móvel celular para uso pessoal por grupo de idade de 2011 até 2015



Fonte: Pesquisa Nacional por Amostra de Domicilio 2015 (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, 2016).

Da proliferação dos telefones móveis surge a oportunidade do sensoriamento por RF. Tema explorado em diversas pesquisas acadêmicas na área do transporte ao longo dos anos, para: validação de matrizes de OD em centros urbanos (CALABRESE et al., 2011), movimentação de passageiros no metrô (AGUILÉRA et al., 2014), cálculo de trajetórias e velocidade de veículos (BHASKAR; CHUNG, 2013) e pedestres (POUCIN; FAROOQ; PATTERSON, 2016), detecção de passageiros em pontos de ônibus (ORANSIRIKUL et al., 2016) e da ocupação de ônibus (DUNLAP et al., 2016). Demonstrando sua relevância e atualidade.

Considerando as diversas formas de sensoriamento de RF exploradas na revisão da literatura, Lesani, Romancyshyn e Miranda-Moreno (2016) apontam que as características do sinal Wi-Fi são indicadas para ambientes confinados e áreas

pequenas, onde a velocidade do objeto monitorado é baixa. Sendo assim, está aderente ao problema de estimar lotação de um ônibus do TP.

Já em relação a escolha do local do estudo, a cidade de São Paulo, possui uma das maiores operações de ônibus do mundo. Segundo relatório da SPTrans (2018) há um total de 1,135 linhas, que percorrem 4,600 km de vias e transportam, em média, 230 milhões de passageiros por mês. Apesar de contar com tecnologias de localização automática do veículo (*Automatic Vehicle Location, AVL*) e coleta automática de tarifa (*Automatic Fare Collection, AFL*), não se vê, até o momento, nenhuma tecnologia para contagem automática de passageiros (APC).

Dada a importância econômica da região e o tamanho da operação, aliada a poucos exemplos de sensoriamento por RF no TP no Brasil, surge a justificativa de estudar sua aplicação neste contexto.

1.3 METODOLOGIA

A pesquisa se desenvolve em torno de um estudo de campo do sensoriamento de passageiros de ônibus, através do sinal de Wi-Fi em seus celulares. Para obter mais informações sobre o assunto, foram estudadas as principais técnicas de APC assim como os métodos mais recentes de sensoriamento por RF. A revisão da literatura explora as diferentes tecnologias de RF empregadas, e conclui com uma visão geral do protocolo Wi-Fi (IEEE 802.11).

O método de coleta de dados seguido pela análise estatística, foi definido a partir dos exemplos relatados por Handte, et al. (2014) e Dunlap, et al. (2016), que realizaram experimentos similares nas cidade de Madrid na Espanha e Seattle nos Estados Unidos, respectivamente. Assim foi definida a amostra, o protótipo e aplicado o experimento de campo, testando o efeito da solução em relação a técnicas de ocupação tradicionais, através de uma pesquisa quase-experimental, onde se permite a seleção controlada da população estudada (CAMPBELL; STANLEY, 1963).

O campo amostral foi selecionado de forma a contemplar as diversas situações que uma linha de ônibus enfrenta durante a sua operação. Assim, a coleta de dados se deu em diferentes dias úteis da semana nos horários de pico da manhã e noite, e entre picos numa única rota.

O instrumento de validação escolhido foi o método tradicional de aferição da ocupação através de uma pesquisa visual. Tal qual como descrito por Santana (2015), a pesquisa visual consiste em um formulário (ANEXO A) onde o pesquisador classifica a ocupação do veículo de acordo com a densidade de pessoas dentro deste (ver Tabela 1), no momento que ele fecha as portas e segue seu trajeto.

Tabela 1 – Escala de classificação da ocupação de um veículo

Nível	Descrição
1	Parcialmente sentados
2	Sentados
3	25% de ocupação
4	50% de ocupação
5	75% de ocupação
6	90% de ocupação
7	Lotado
8	Superlotado

Fonte: Santana (2015, p. 31).

As ferramentas estatísticas utilizadas proporcionaram uma análise quantitativa dos dados coletados. Foi utilizada estatística não paramétrica, por se tratar da técnica aplicável para dados discretos e distribuições categóricas (SIEGEL; CASTELLAN, 2008). Desta forma, é comprovada ou não a aderência dos dados coletados com a informação de referência. A análise qualitativa é feita por meio de comparação dos aspectos gerais observados na análise em contraste com a prática ou teoria. Por fim, uma análise de variância para verificar de forma quantitativa o ajustamento dos dados coletados com a realidade (WILLMOTT; MATSUURA, 2005).

O teste estatístico e análise de variância utilizados para análise dos dados, bem como suas respectivas hipóteses testadas, foram:

a) Qui quadrado de aderência:

H_0 : A distribuição de probabilidades ocorrida (observada) não é a mesma da distribuição esperada, segundo suposições baseadas na teoria.

H_1 : A distribuição de probabilidades ocorrida (observada) é a mesma da distribuição esperada, segundo suposições baseadas na teoria.

b) Raiz do erro quadrático médio

Para a análise espacial foram utilizados de mapas do trajeto percorrido, com o intuito de visualizar a matriz de OD das viagens (LIU et al., 2013), os tipos de mapa utilizados foram:

c) Mapas de trajetória**d) Mapas de densidade****1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO**

No primeiro capítulo o tema é introduzindo destacando os efeitos do excesso de lotação no TP por ônibus, evidenciando as razões da pequena adoção de tecnologias para contagem automática de passageiros e apontando o sensoriamento por RF como uma possível solução para este problema. O capítulo também contempla a definição dos objetivos, a justificativa e a metodologia adotada na pesquisa.

A revisão da literatura, do capítulo 2, apresenta alguns dos principais elementos da operação do transporte público e seus indicadores de qualidade. Seguido de uma análise exploratória das tecnologias de APC disponíveis para o TP e aprofundando nas técnicas de sensoriamento por RF. Concluindo, com a descrição técnica do protocolo Wi-Fi e como utilizá-la para o sensoriamento de pessoas.

No capítulo 3, é descrito o processo do experimento de campo, detalhando o protótipo construído, o algoritmo para o cálculo de ocupação e o procedimento de amostragem utilizado para coleta de dados.

Em seguida, no quarto capítulo, os dados coletados durante o experimento são apresentados, analisados estatisticamente e discutidos, a fim de obter a eficiência do método proposto. Da mesma forma são exibidos os produtos do experimento através de gráficos, mapas de ocupação e análise da velocidade da linha estudada.

Por fim, o quinto capítulo apresenta as conclusões e sugestões para estudos futuros.

2 REVISÃO LITERÁRIA

A partir do tema da lotação dos ônibus, suas consequências sociais e materiais, e formas de atenuar seus efeitos, se fazem necessárias as definições formais sobre o transporte público por ônibus, seus atributos de qualidade e as tecnologias que auxiliam na sua gestão, destacados no decorrer deste capítulo.

2.1 TRANSPORTE PÚBLICO POR ÔNIBUS

Dos modais de transporte público (TP) o mais comum nos centros urbanos, em especial no Brasil, é o ônibus. Comparado com outras alternativas de TP, é aquele que requer o menor investimento inicial para ser implantando e operado, já que se utiliza da infraestrutura viária já existente, como explica Vuchic (2002). Fato que justifica sua larga adoção, principalmente em países em desenvolvimento.

Por outro lado, os ônibus acabam competindo com outros tipos de veículos de uso misto e privado, contribuindo para gerar congestionamentos e afetando os parâmetros de qualidade da operação.

Conforme dell'Olio, Ibeas e Ruisánchez (2012), a experiência internacional ratifica que é mais eficiente utilizar veículo menores e aumentar sua frequência, do que o inverso. Todavia, segundo os autores, essa generalização acaba gerando custos desnecessários e uma operação mais complexa, concluindo que, cada linha deve ser planejada de acordo com as características do trajeto e da demanda.

Outra tática comum para aumentar a eficiência operacional do serviço é a implantação de corredores exclusivos de ônibus, afirmam Khoo, Teoh e Meng (2014). Os autores ainda complementam que os corredores comprovadamente aumentam a velocidade média, reduzindo o tempo de viagem e possibilitam veículos com maior capacidade de passageiros.

Mediante o exposto, observa-se que os principais parâmetros operacionais utilizados para aumentar a capacidade de uma linha são: aumentar a frequência e/ou o tamanho dos veículos (JARA-DÍAZ; GSCHWENDER, 2009). Um exemplo deste comportamento é o sistema de transporte rápido por ônibus (*Bus Rapid Transit*, BRT), que se utiliza de veículos articulados com capacidade para até 270 passageiros (ver Figura 1), assemelhando-se a operação por trens. Entretanto, é perceptível que há

limites físicos, espaciais e ambientais que não serão superados com as estratégias atuais. Então pergunta-se: o quão sustentável é esse plano no longo prazo?

Figura 1 – Veículo biarticulado, com 28 metros e capacidade para 270 passageiros do sistema BRT de Curitiba



Fonte: Mendonça (2014)

Em resumo, percebe-se que o TP por ônibus é um dos mais versáteis e importantes modais de transporte disponíveis. Em vista que as cidades estão se tornando cada vez maiores, criando obstáculos à mobilidade urbana, o desafio dos operadores é aumentar a qualidade do serviço prestado, considerando todas as variáveis econômicas e sociais impostas, buscando novas soluções para atender a população. É nesta intersecção que os Sistemas Inteligente de Transporte (ITS) atuam, visando aumentar a eficiência e confiabilidade da operação através da tecnologia.

2.2 PARÂMETROS DE QUALIDADE NO TRANSPORTE PÚBLICO

Segundo Fitzsimmons e Fitzsimmons (2010), uma das características que define serviço é a participação obrigatória do cliente no processo. Parasuraman , Zeithaml e Berry (1988), em seu artigo clássico sobre SERVQUAL⁴, definem a

⁴ Método de pesquisa para mensurar a qualidade em serviços.

qualidade de um serviço como o resultado da expectativa do consumidor – sobre o que deveria ser oferecido – em comparação com a performance percebida durante sua execução. No entanto, apesar de estar associada a fatores psicológicos, sua gestão deve estar pautada em tópicos tangíveis embasados nas expectativas dos usuários.

Conforme Redman et al. (2013), os aspectos de qualidade no TP podem ser classificados em quantitativos ou qualitativos (ver Tabela 2). O primeiro, trata dos aspectos vinculados ao seu desempenho operacional, enquanto o segundo da impressão que os passageiros têm do serviço. Entretanto, os autores destacam que há uma discrepância entre a qualidade avaliada pelos operadores e a percebida pelo usuário, visto que, o primeiro está preocupado com indicadores de performance e não com a satisfação dos viajantes.

Tabela 2 – Atributos de qualidade do transporte público

Aspecto	Atributo
Quantitativos	Confiabilidade
	Frequência
	Velocidade
	Acesso
	Preço
	Informações
	Facilidade de transferência
	Condições do veículo
Qualitativos	Conforto
	Segurança
	Conveniência
	Estética

Fonte: Adaptado de Redman, et al. (2013, p. 121), tradução do autor.

Isso posto, Hendren, et al. (2015) sugerem que a mudança de paradigma para uma operação centrada no passageiro, passa pela tradução dos indicadores técnicos em termos das necessidades do usuário. Desta forma, *headway*⁵, velocidade média, passageiros por minuto, número de veículos, são resumidos em: Quanto tempo se leva

⁵ Jargão da engenharia de tráfego que denota a distância entre um veículo e outro.

para chegar do ponto A ao B em dado horário? Quanto tempo de espera até o próximo veículo? E assim por diante.

A comunicação do estado da operação em tempo real, é também um fator importante neste processo já que reduz a incerteza e ajuda a controlar a expectativa dos usuários, durante a prestação do serviço, como explicam Hendren, et al. (2015). Observa-se que tal objetivo só é possível através do investimento em sistemas de informação e tecnologias de ITS na operação.

Dos atributos da qualidade citados anteriormente, diversos autores citam a confiabilidade e a frequência do sistema, como os mais importantes para a satisfação dos passageiros (CANTWELL; CAULFIELD; O'MAHONY, 2009; REDMAN et al., 2013; HENDREN et al., 2015). Alegando que os usuários estariam, inclusive, dispostos a pagar a mais por um sistema sem atrasos e pouco tempo de espera.

No entanto, de acordo com Jara-Díaz e Gschwender (2009), o modelo econômico que minimiza o custo do usuário⁶ (veículo menores e mais frequentes), só seria possível com o aumento do subsídio do poder público, em virtude de manter uma operação menos eficiente. Em contrapartida, a minimização do custo da operação, acarreta o efeito oposto (veículos maiores e frequências menores), porém, em detrimento da satisfação dos usuários. Por fim, o modelo ótimo se dá quando ambos os custos são combinados obtendo economia de escala e buscando reduzir o conflito de interesse entre as partes.

Sob outra perspectiva, Cantwell, Caulfield e O'Mahony (2009) afirmam que o excesso de passageiros é o maior causador de estresse nos passageiros, superando o tempo de viagem. Da mesma forma, Tirachini, Hensher e Rose (2013) acrescentam que além da dimensão do conforto, um veículo lotado, também apresenta mais variabilidade nos parâmetros operacionais, aumentando os tempos de paradas e espera, duração da viagem.

Conclue-se, portanto, que os efeitos da ocupação do veículo vão além do bem-estar e impactam diretamente na expectativa dos usuários de um sistema mais confiável. Apesar das pesquisas citadas não mencionarem o conforto como uma questão importante para a satisfação das pessoas, observa-se que este é um dos

⁶ Valor monetário do tempo total (acesso, espera e deslocamento) da viagem de um usuário do transporte público (JARA-DÍAZ; GSCHWENDER, 2009).

pontos principais que afastam um usuário do TP (REDMAN et al., 2013). Pois, esse indicador também se mostra relevante tanto para as questões qualitativas quanto quantitativas da qualidade.

2.3 SISTEMAS INTELIGENTES DE TRANSPORTE

Qualquer conjunto de tecnologias aplicadas no contexto de transportes é considerado ITS, afirmam Darido e Pena (2012), e compreendem qualquer técnica de operação, monitoramento, informação e automatização dos atores que compõe o sistema.

Devido a quantidade de variáveis estocásticas que atuam sobre o TP, vê-se que as ferramentas de ITS auxiliam na gestão da operação e seus indicadores de qualidade (ZHOU et al., 2016). Juntamente com tecnologias de comunicação sem fio permitem a alocação mais eficiente dos recursos e no processo de informação de todas as partes envolvidas, reduzindo as incertezas e aumentando o nível de satisfação dos passageiros (ZHAO; ZHOU, 2018).

Na operação da frota de ônibus, podem se destacar três ferramentas de ITS como as mais recorrentes na literatura: bilhetagem automática (AFC), localização em tempo real (AVL) e contagem automática de passageiros (APC). A primeira, facilita a cobrança de tarifa e o tempo de embarque e desembarque (PELLETIERA; TRÉPANIÉRA; MORENCY, 2011), a segunda permite a medir os indicadores de performance e regularidade da linha (MA; WANG, 2014) e a última a ocupação do veículo, que possibilita retratar com fidelidade as matrizes de OD dos passageiros (JI et al., 2014).

No entanto, apenas as duas primeiras (AFC e AVL) são amplamente empregadas na frota, enquanto o APC é geralmente aplicado em apenas 10% à 15% dela, como afirmam Barabino, Di Francesco e Mozzoni (2014). Os autores complementam, que os problemas das tecnologias recentes são: integração com os sistemas existentes, validação dos dados adquiridos, controle de anomalias causadas por erros de calibração e relatórios com pouca utilidade prática.

Igualmente, concluem Furth, Strathman e Hemily (2005), afirmando que sua baixa adoção se deve a fatores como alto custo de aquisição e manutenção, além, da dificuldade de processar e interpretar os dados obtidos. Observa-se, que em quase 10

anos que separam os dois trabalhos, esse panorama pouco mudou, indicando a falta de técnicas melhores e mais atualizadas de APC.

Dada a importância que da informação da ocupação tem, tanto para os operadores, quanto para os passageiros, se faz necessário um olhar mais crítico sobre os métodos disponíveis de contagem de passageiros e suas características.

2.3.1 Contagem automática de passageiros

Conforme o relato de Cui (2006), as técnicas de APC habitualmente utilizadas são: através do processamento de imagens, sensores de peso e sensores infravermelhos (*Infrared Radiation*, IR) nas portas do veículo.

2.3.1.1 Por sensores infravermelhos

Sendo um dos primeiros tecnologias de APC utilizada, consiste na instalação de dois feixes de IR dispostos paralelamente a centímetros um do outro, em cada porta do veículo. A contagem de passageiros é dada quando os feixes são interrompidos em sequência, determinando a direção do movimento de entrada ou de saída (DEIBEL; WOOD, 1977).

Segundo Moore e Giuliano (2002), sua leitura apresenta um descolamento muito grande da realidade, especialmente quando o veículo está lotado. O relato ainda inclui que os sensores são facilmente perturbados por partículas no ar e pela movimentação do veículo, gerando um número alto de falsas contagens e contribuindo para diminuir sua precisão.

Em um relato sobre a performance destes dispositivos, Strathman, Kimpel e Callas (2005) informam que a incerteza do sistema é de aproximadamente 12,3% do total de passageiros, sendo que 5,4% é derivado de contagens erradas de embarques e 6,9% de desembarques. Indicando que o erro é se dá, principalmente, quando há pessoas entrando e saindo pela mesma porta e, por fim, mencionam que a precisão também é afetada por condições climáticas e de temperatura.

Percebe-se que relatos recentes da utilização de IR são escassos, indicando que tal tecnologia esta cada vez mais em desuso, provavelmente, devido a sua baixa precisão.

2.3.1.2 Por sensores de peso

Outra forma de, indiretamente, estimar o número de passageiros, é através do peso do veículo, posto que a ocupação está diretamente relacionada à massa do veículo. Sua aplicação é mais comum em trens, que contam com um sistema de pesagem eletrônica para ajustar o sistema de frenagem (NIELSEN et al., 2014).

De acordo com Nielsen et al. (2014), a principal vantagem deste método sobre os outros é que não se faz necessário manter o estado da ocupação, de modo que não acumula os erros de leituras cometidos durante a viagem, tornando-o mais resiliente a falhas. Os autores concluem que a incerteza da medida final é de 10 a 15 pessoas e que o sistema só mede em unidades de 4 ou 5 pessoas (dependendo do peso médio de cada passageiro), por conta da precisão do equipamento de pesagem.

Kotz, Kittelson e Northrop (2015), sugerem sua viabilidade no TP por ônibus nas suspensões a ar que, segundo eles, é adotada em quase todos os veículos. O processo é similar ao descrito para os trens, utilizando um peso médio de 76 kg por passageiro, os resultados relatados apresentaram um erro de 12.53% da ocupação real. Entretanto, o sistema apresenta problemas em condições de vias esburacadas quando a suspensão é mais exigida. Da mesma forma, assume-se que a calibragem e manutenção dos amortecedores esteja em dia para efetuar uma medida correta.

Por fim, uma última alternativa através de sensores de peso é a utilização de pisos sensíveis à pressão nos degraus do ônibus (CUI, 2006). Seu funcionamento é similar ao IR, no qual a sequência de ativação determina a direção dos passageiros. Novamente, relatos da sua aplicação são raros, uma explicação para isso é dado por Baltés e Ray (1999), que afirmam que a tecnologia apresenta diversas inconsistências, em particular, por influências ambientais e climáticas (como neve, chuva, sal nos sapatos) e quando passageiros agem de forma não usual.

2.3.1.3 Por processamento de imagens

O método consiste no uso de câmeras de vídeos num circuito fechado de televisão (*Closed-Circuit Television*, CCTV), estrategicamente posicionadas para capturar imagens de dentro do veículo ou nas paradas. Com o auxílio de técnicas de

reconhecimento de imagens, permite contar o número de passageiros que entram e saem do veículo.

Lumentut e Gunawan (2015) descrevem tal abordagem em paradas de ônibus do sistema de BRT de Jakarta, Indonésia. Câmeras direcionadas para as portas dos ônibus, registram o embarque e desembarque de passageiros. Os autores comentam que a performance geral do método foi de apenas 19%, gerando uma quantidade muito grande de falsos positivos. A explicação encontrada é que o erro é derivado do acúmulo de passageiros nas paradas, dificultando a distinção de quem entrou ou saiu, daqueles que apenas cruzaram o limiar da câmera.

Por outro lado, o CCTV também pode ser aplicado dentro do veículo. Perng et al. (2016) relatam um experimento onde foram instaladas câmeras logo acima das portas dos veículos. Os resultados apresentados obtiveram uma acurácia média de 87% na contagem de passageiros. Contudo, viu-se que esse procedimento é diretamente impactado pela luminosidade do ambiente. No período noturno a acurácia foi de 75% enquanto que durante o dia era maior que 88%.

Segundo Dan et al. (2012), a maior fonte de erros do método de processamentos de imagens são: as mudanças de luminosidade, quando o passageiro está vestido com a mesma cor que o ambiente ou com texturas complexas e quando há uma grande quantidade de pessoas embarcando ou desembarcando. Por fim, sugerem a combinação de câmeras com sensores IR para reduzir a ambiguidade nos casos citados anteriormente, reportando uma acurácia de 98% para a detecção de pessoas e sua direção.

A opção por câmeras de vídeos com IR é a melhor tecnologia de APC disponível atualmente. Entretanto, o seu custo pode chegar a \$8.000 dólares americanos por unidade, conforme informam Kotz, Kittelson e Northrop (2015), aumentando o interesse dos operadores com restrições orçamentárias, em buscar tecnologias que possuem um custo menor.

2.4 SENSORIAMENTO ATRAVÉS DE RADIOFREQUÊNCIAS

Com a popularização dos telefones celulares e *smartphones* e dos protocolos de comunicação sem fio, o sensoriamento por radiofrequência (RF) tem sido aplicado para estudar a movimentação de pessoas com os mais diversos propósitos. No TP sua

principal aplicação se dá na substituição das matrizes de OD, que são usualmente demoradas e dispendiosas (JI et al., 2014).

A principal característica que atrai a atenção da RF é que esta fica disponível no ambiente no momento que o dispositivo móvel está ligado (CALABRESE et al., 2011), permitindo aos pesquisadores capturarem os dados de forma passiva, sem o consentimento prévio ou a instalação de nenhum software adicional (MA; ZHAO; YUAN, 2014). Apesar de haver preocupações sobre a privacidade dos usuários, a técnica mais utilizada, durante o seu processamento, é a anonimização dos dados, garantindo que nenhuma informação pessoal seja revelada (GANTI; YE; LEI, 2011)

Os principais sinais de RF emitidos pelos aparelhos móveis e utilizados para o sensoriamento são: o GSM, o Bluetooth e o Wi-Fi. Cada uma dessas tecnologias é explorada nesta seção.

2.4.1 Método pela rede de telefonia celular

O GSM é o protocolo de comunicação sem fio para telefones celulares mais adotado ao redor do mundo, permitindo a seus usuários transmitirem informações de voz e dados através de seus dispositivos móveis.

Em função da sua ampla aceitação e disponibilidade, Calabrese et al. (2011) exploram o sinal para capturar a movimentação de pessoas em longas distâncias, através da triangulação da infraestrutura de antenas das Estações Rádio Base (ERB) utilizadas para fazer a conexão de última milha – da rede com os aparelhos móveis. Conforme o relato dos autores, através da técnica foi possível inferir padrões de OD da cidade de Roma por diversos dias, com erros abaixo de 18%, se comparados com os dados reais.

Por outro lado, dado que as antenas ficam afastas uma das outras por centenas de metros, a precisão desse sistema de localização está entre 250 m e 3 km, dependendo da densidade de ERBs disponíveis na localidade (CALABRESE et al., 2011). Como resultado a sua performance diminui em cidades pequenas ou zonas rurais, que por possuírem menos pessoas não requerem a instalação de muitas antenas.

Da mesma forma, ainda segundo o relato de Calabrese et al. (2011), a performance também é afetada pelo uso dos celulares, o que significa que mais dados

são coletados durante o dia do que a noite. Não obstante, os autores concluem que o método é uma alternativa as pesquisas OD tradicionais e sua validação, uma vez que devido ao seu custo inferior podem ser aplicadas com maior frequência.

No TP, o sinal de GSM foi aplicado por Aguiléra et al. (2014) no metrô de Paris para medir parâmetros operacionais como trajetória da pessoas e ocupação dos carros. O resultado mostra que 80% dos dados de lotação obtidos por este dispositivo, correspondem aos dados observados em campo.

Entretanto, os autores ainda expressam que a principal barreira para sua adoção é firmar acordos com as operadoras de telefonia celular para a transferência de dados. Por essa razão, apenas uma fração dos passageiros é capturada (os clientes da operadora contratada), sendo necessário a extrapolação dos dados para toda a população a partir de informações de *market share*. Por fim, como indicado na conclusão do trabalho supracitado, a utilização do sinal de GSM só foi possível por conta da característica confinada das estações de metrô da capital francesa e por essas possuírem ERBs próprias, o que ajuda a explicar os resultados positivos do experimento (AGUILÉRA et al., 2014).

2.4.2 Método por Bluetooth

Além dos protocolos de comunicação de longa distâncias, muitos dispositivos móveis contam com outro conjunto de tecnologias de RF para a transferência de dados em curtas distâncias, como: o Bluetooth, o NFC e o Wi-Fi.

Esses protocolos operam no espectro livre de RF e não requerem nenhuma licença de agentes governamentais para sua utilização, ao contrário do protocolo GSM (HAJMOHAMMAD; ELBIAZE, 2013). Usualmente são empregados para a criação de redes pessoais de dados com baixo consumo de energia. Do mesmo modo, o seu sinal pode ser utilizado no sensoriamento de pessoas, porém, em áreas menores de 30 m até 50 m (ABEDI et al., 2015).

Num experimento realizado por Bhaskar e Chung (2013) na cidade de Brisbane, Austrália, foi utilizado o sinal de Bluetooth para detectar a rota e tempo de viagem de veículos. Antenas foram posicionadas nas intersecções de algumas ruas, capturando

o endereço *Media Access Control*⁷ (MAC) dos dispositivos móveis que trafegaram nas seções monitoradas.

Os resultados apresentados pelos autores, mostram que o erro do tempo de viagem foi inferior a 10 segundos. Apesar do método não ser adequado para rastrear um único veículo, observou-se que o erro estimado diminuiu quando calculada a média de todos os tempos. Este efeito é devido ao fato que nem todos os usuários ligam a opção de Bluetooth nos seus celulares, comprometendo o resultado do experimento.

Comumente o sinal de Bluetooth é usado como uma segunda opção de outros métodos de sensoriamento de RF, justamente por que muitos usuários escolhem desligá-lo para economizar a bateria de seus dispositivos. Além do mais, sua aplicação é geralmente mais indicada para o sensoriamento de objetos em altas velocidades, devido a sua alta taxa de transferência de dados, que em outras palavras: produz maior quantidade de dados num espaço menor de tempo (LESANI; ROMANCYSHYN; MIRANDA-MORENO, 2016).

2.4.3 Método por Wi-Fi

Segundo a literatura examinada, dos sinais de RF é o que apresenta melhor resultados para o rastreamento de movimentação de pessoas em áreas pequenas ou confinadas (MUSA; ERIKSSON, 2012; LESANI; MIRANDA-MORENO, 2016; POUICIN; FAROOQ; PATTERSON, 2016).

Sua utilização se dá além do sensoriamento de pessoas, pois, também é utilizado para aumentar a precisão do GNSS embutido nos telefones móveis, num procedimento conhecido como sistema de posicionamento por Wi-Fi (*Wi-Fi positioning system*, WPS), que funciona através da triangulação de roteadores disponíveis na região (BHATT; BABU; CHUDGAR, 2017).

Tendo as mesmas características de sensoriamento do protocolo Bluetooth, como: coleta passiva e anônima de dados, taxa de transferência contínua e precisão na casa do metro; vê-se que o Wi-Fi é utilizado com maior frequência do os outros protocolos de curta distância citados anteriormente.

⁷ Identificador único da placa de comunicação sem fio (INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, 2016; INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, 2017).

Aplicado no TP, Oransirikul et al. (2016) instalaram antenas Wi-Fi em paradas de ônibus em Kyoto, Japão, para estimar o acúmulo de pessoas e o embarque e desembarque dos veículos. O relato apresenta um algoritmo para diferenciar as pessoas (viajantes) que estão aguardando o TP, pelo avistamento consecutivo do mesmo endereço MAC por um período mínimo de tempo e também pela intensidade do sinal. Observa-se, pelos resultados apresentados pelos autores, que 40% do total de passageiros numa estação terminal foram detectados pelo método, enquanto, um número menor (28%) em pontos de ônibus nas ruas. A hipótese retirada dessa leitura é que pela maior quantidade de passageiros nas estações, a amostra é mais diversificada que pontos de ônibus, apresentando uma eficiência maior (ORANSIRIKUL et al., 2016).

Uma outra forma de calcular a ocupação é a instalação de antenas dentro do próprio veículo. Dunlap et al. (2016) desenvolveram um experimento desse tipo na cidade de Seattle, Estados Unidos, com o objetivo calcular a matriz de OD dos passageiros de uma única linha durante o período de uma semana. Utilizando uma combinação do sinal de Wi-Fi e Bluetooth, o algoritmo para detectar passageiros apresentado pelos autores, descarta sinais avistados por menos de 1 minuto (transeuntes) ou mais de 1 hora (tempo total da viagem). Indicando que um único dispositivo é avistado, em média, a cada 20 segundos durante a duração da viagem (DUNLAP et al., 2016).

Apesar de não haver indicações da acurácia do método, os autores concluem que o sensor foi capaz de capturar as regiões no qual tiveram mais embarques e desembarques, validada de acordo com as observações dos mesmos (DUNLAP et al., 2016). Por fim, observa-se que apesar do sinal de Bluetooth gerar mais dados, o sinal de Wi-Fi demonstrou identificar um número maior de pessoas durante o experimento, indicando ser o mais utilizado pelos usuários.

Igualmente, Handte et al. (2014) aplicaram o mesmo procedimento na cidade de Madrid, Espanha, onde 3 veículos foram equipados com uma antena que captura os dados de Wi-Fi por 3 semanas. Os resultados foram exibidos através de mapas de densidade do carregamento de linhas nas regiões urbanas. Apesar de que o instrumento apenas coletou 20% do total de passageiros, concluiu-se que o método

consegue capturar as mudanças do estado da ocupação durante o trajeto (vazio, moderado, cheio, lotado), mas não a contagem discreta de passageiros.

Finalmente, à luz dos fatos exibidos ao longo desta seção, o sinal de Wi-Fi, demonstra ser a melhor opção de APC por RF para o TP por ônibus, apesar de suas limitações. A seguir, é explorada as questões técnicas do protocolo (formalmente conhecido por IEEE 802.11) para compreender como ele permite o sensoriamento de pessoas.

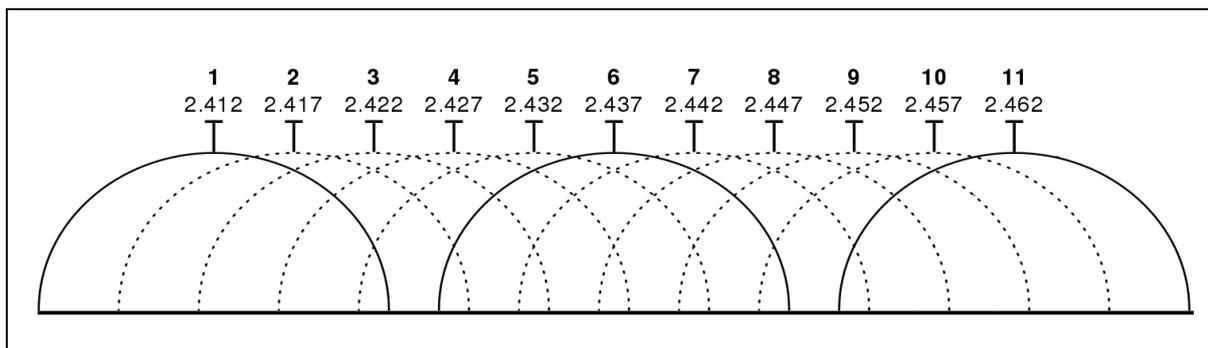
2.5 PROTOCOLO DE COMUNICAÇÃO SEM FIO IEEE 802.11

O protocolo IEEE 802.11, desenvolvido e mantido pelo Instituto de Engenheiros Elétricos e Eletrônicos (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*, IEEE), é um padrão internacional de redes sem fio de computadores, que utiliza as frequências de banda 2.4 GHz e 5 GHz para a transmissão de dados. Essas bandas fazem parte do espectro livre de RF, portanto, não precisam de autorização de agências governamentais para serem utilizadas e são amplamente empregadas por dispositivos portáteis como: *notebooks*, *tablets* e telefones celulares (GAUTHIER, 2013).

Seu componente principal é chamado de estação sem fio, que consiste de uma antena que pode operar em três modos diferentes: receptor, transmissor ou repetidor (INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, 2016). O transmissor, também conhecido por roteador ou ponto de acesso, é responsável por autenticar, conectar e distribuir o sinal de rede entre os receptores e repetidores, permitindo a transmissão de dados entre eles.

Cada transmissor se associa a um canal dentro dos limites da frequência (Figura 2) e passa a escutar os sinais emitidos nela. Um receptor que deseja se conectar com uma rede, primeiramente, deve enviar a todos os canais uma requisição de sondagem (*probe request*, PR) para descobrir os roteadores disponíveis.

Figura 2 – Representação gráfica dos canais da frequência 2.4 GHz



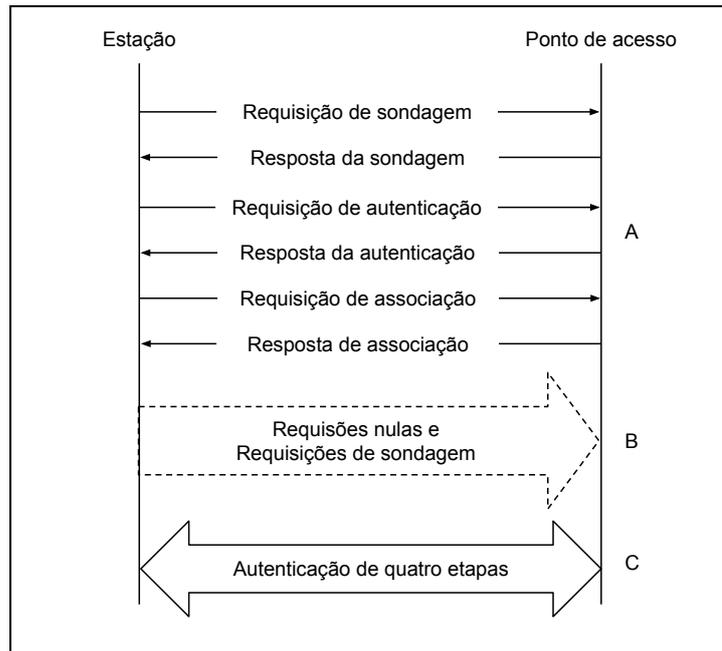
Fonte: Gauthier (2013, p. 10).

A PR é um sinal digital com dados codificados no formato binário, que contém informações sobre o receptor, a mais importante delas é o endereço MAC, um identificador único e intransferível da placa de rede do dispositivo móvel. Então, os roteadores dentro do alcance, respondem a requisição com suas próprias informações, como: nome da rede, canal de atuação, tipo de autenticação, força do sinal e assim por diante (INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, 2016).

Após o processo de descoberta dos transmissores, o receptor pode optar por se conectar a ele, através do processo de autenticação e associação, como ilustrado pela Figura 3. A partir do último passo, todas as informações trocadas entre receptor e transmissor passam a ser criptografadas garantindo a segurança e privacidade na transferência de dados. Mas, de tempos em tempos, o receptor reenvia a PR para verificar se o ponto de acesso ainda está disponível e verificar suas condições (MUSA; ERIKSSON, 2012).

O método de sensoriamento do sinal de Wi-Fi consiste em escutar e capturar as requisições de sondagem (PR) emitidos pelos aparelhos móveis (ORANSIRIKUL et al., 2016). Uma vez que o endereço MAC contido na mensagem tem a garantia de ser único, pode ser utilizado para identificar o mesmo dispositivo em diferentes locais e momentos.

Figura 3 – Etapas do processo de conexão em uma rede Wi-Fi



Fonte: Musa e Eriksson (2012, p. 8), traduzido pelo autor.

O endereço MAC é um número inteiro, formado pela combinação de 48 bits, associado à interface de controle de rede de qualquer equipamento eletrônico (INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, 2016). Os três primeiros octetos (ver Figura 4) incluem o identificador único da organização (*Organizationally Unique Identifier*, OUI) atribuído pela IEEE ao fabricante do componente de rede (INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, 2017). O IEEE como agência reguladora dos endereços MAC mantém uma lista pública dos fabricantes e seus respectivos prefixos OUI, permitindo sua identificação (INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, 2018).

Figura 4 – Estrutura de um endereço MAC-48

Identificação do octeto	0	1	2	3	4	5
Componente MAC	OUI 24-bit			Extensão 24-bit		
Exemplo em hexadecimal	AC	DE	48	23	45	67
Exemplo em binário	1010 1100	1101 1110	0100 1000	0010 0011	0100 0101	0110 0111

Fonte: Adaptado de IEEE (2017, p. 9), traduzido pelo autor.

Em síntese, observa-se que o sensoriamento do protocolo Wi-Fi se dá através da captura do sinal de PR e o armazenamento do endereço MAC, que permite identificar além do dispositivo em si, o seu fabricante, o que pode ser explorado para inferir o tipo do equipamento: computador, *notebook*, telefone móvel, etc.

2.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo observou-se que o TP por ônibus é um dos modos de transportes mais importantes devido a sua facilidade de implantação e operação, uma vez que utiliza a infraestrutura viária já existente (VUCHIC, 2002).

O seu planejamento é feito através de pesquisas de OD que são traduzidas nas linhas, na frequência dos veículos e na capacidade de passageiros transportados por hora, visando a minimização do custo operacional (JARA-DÍAZ; GSCHWENDER, 2009). Entretanto, viu-se que as estratégias de otimização das linhas visando atender o aumento do número de passageiros, causado pelo crescimento contínuo das cidades, não são sustentáveis no longo prazo.

Por outro lado, percebe-se que a operação está muitas vezes desalinhada com as expectativas dos seus usuários, causando a evasão do TP e gerando um impacto negativo na mobilidade urbana (REDMAN et al., 2013). Devido à natureza estocástica do TP, a utilização de sistemas de informação em tempo real ajuda a reduzir as incertezas dos seus passageiros e aumentar a confiabilidade do TP, adequando as expectativas e permitindo a tomada de decisões mais assertivas (HANDTE et al., 2014).

Dos parâmetros de qualidade do TP por ônibus apresentados na segunda seção, um dos mais sensíveis tanto para os passageiros quanto para a operadores, é a ocupação do veículo.

Quando o ônibus passa a operar perto da sua capacidade máxima, vê-se que indicadores operacionais como: velocidade média, tempo total de viagem, *headway* e tempo de embarque e desembarque, são desajustados, aumentando a variabilidade do sistema e conseqüentemente diminuindo sua qualidade (TIRACHINI; HENSHER; ROSE, 2013).

Contudo, ainda pouco se sabe da ocupação do veículo em tempo real, devido ao custo de implantação e manutenção ou a baixa precisão das tecnologias de APC

disponíveis para tal finalidade (FURTH; STRATHMAN; HEMILY, 2005; BARABINO; DI FRANCESCO; MOZZONI, 2014), conforme explorado na terceira seção.

Das diversas formas de sensoriamento por RF, exploradas na quarta seção deste capítulo, o sinal de Wi-Fi é o mais adequado para áreas pequenas e espaços confinados, onde a velocidade do objeto monitorado é baixa (LESANI; ROMANCYSHYN; MIRANDA-MORENO, 2016). Consequentemente, devido à similaridade das características com o TP por ônibus, observa-se um crescente interesse da comunidade acadêmica na sua aplicação no problema de APC (HANDTE et al., 2014; ORANSIRIKUL et al., 2014; DUNLAP et al., 2016).

Em função das informações coletadas sobre o sensoriamento de pessoas por RF e do protocolo Wi-Fi, o próximo capítulo se concentra na proposição e no desenvolvimento de um método, visando sua aplicação num experimento de campo.

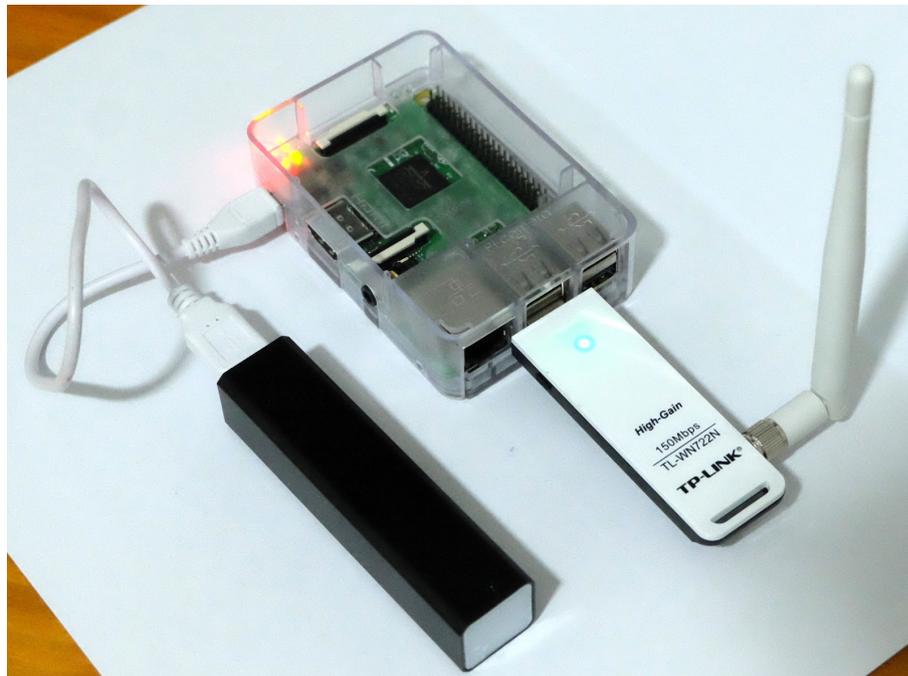
3 DESCRIÇÃO DO MÉTODO

Como visto no capítulo anterior, da captura e armazenamento das sondagens de requisições (PR) pode-se estimar a quantidade de telefones móveis no alcance de uma antena Wi-Fi. Para este fim foi desenvolvido um protótipo de APC, a partir de componentes de hardware disponíveis em lojas de eletrônicos e utilizado um algoritmo para estimar a ocupação do veículo, como será descrito neste capítulo.

3.1 HARDWARE

O protótipo foi construído utilizando como base um microcontrolador Raspberry Pi Model B, um computador miniaturizado com pinos digitais e analógicos que permitem sua extensão e programação, rodando uma distribuição do Sistema Operacional (SO) Linux oferecida pelo fabricante. Numa das portas de USB foi anexada a antena Wi-Fi TP-Link TL-WN722N com capacidade de operar em todos os modos do protocolo (transmissor, receptor e repetidor) e também no modo promiscuo⁸ (ver Figura 5).

Figura 5 – Vista superior do protótipo com a Raspberry Pi, antena Wi-Fi e bateria externa



Fonte: Autoria própria (2018).

⁸ Modo de operação da interface de rede que permite inspecionar todos os pacotes de dados.

Igualmente, foi incorporado um módulo de localização global (*Global Positioning System*, GPS) U-blox Neo-6M, para permitir a análise geográfica dos dados, e uma tela de diodo emissor de luz (*Organic Light-Emitting Diode*, OLED) de 0,95", para exibir o sumário das informações coletadas, o que se provou ser especialmente útil durante a construção e teste do dispositivo. O produto final, que pode ser visto na Figura 6, foi finalizado com uma tampa customizada produzida por uma impressora 3D.

Figura 6 – Versão final do protótipo do contador automático de passageiros



Fonte: Autoria própria (2018).

O custo final do protótipo foi inferior a R\$ 400,00 por unidade. O detalhamento do preço de cada componente, pode ser visto na Tabela 3. Vê-se que o micro controlador representa 70% do custo total, enquanto o restante dos componentes adiciona em média apenas 7%. Salienta-se que os preços exibidos são os praticados no mercado de varejo, sendo assim, há a possibilidade de reduzi-lo com um volume maior.

Tabela 3 – Descrição do custo dos componentes do protótipo de APC

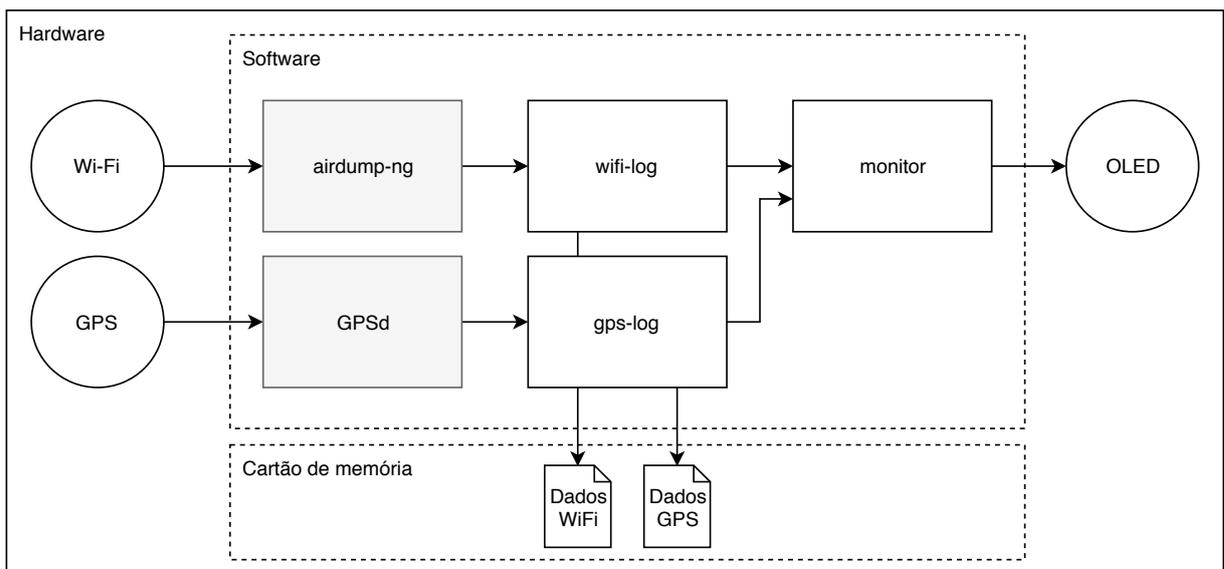
Componente	Preço
Raspberry Pi 3 Model B	R\$ 280,00
TP-Link TL-WN722N	R\$ 39,00
U-blox Neo-6M	R\$ 31,00
Tela OLED 0,95” monocromática	R\$ 30,00
Cabos, conexões e acessórios	R\$ 15,00
Total	R\$ 395,00

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

3.2 SOFTWARE

A Figura 7 sintetiza todos os componentes de software utilizados e suas interações com o hardware. Para a coleta de pacotes Wi-Fi foi utilizado um programa de código livre (*Open-Source Software*, OSS) chamado airdump-ng que decodifica o sinal de rede e permite interagir programaticamente com os dados recebidos pela antena. A mesma solução foi aplicada para o GPS com o GPSSd, outro OSS, que por sua vez decodifica o sinal de latitude, longitude, velocidade e altitude.

Figura 7 – Diagrama dos componentes que compõe o protótipo



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Outros dois programas foram desenvolvidos para capturar os dados das ferramentas OSS e salva-los em arquivos no sistema operacional, eles são o: wifi-log

e o gps-log. Todos os processos são independentes, pois, o GPS demora alguns minutos para fixar a localização e as vezes perde o sinal durante o trajeto, assim garantiu-se que, mesmo com qualquer problema neste, o processo de coleta Wi-Fi não é afetado e vice versa.

Por fim, um terceiro processo foi criado com o intuito de monitorar os dados emitidos pelo GPS e pelo Wi-Fi em tempo real e exibi-los na tela OLED, provendo um meio de acompanhar os dados do experimento durante sua execução. O código fonte dos softwares desenvolvidos nesta pesquisa foi disponibilizado *online* no GitHub⁹, acessível para consulta através do endereço <https://github.com/hilios/wifi-apc>.

3.3 COLETA DE DADOS

De acordo com Campbell e Stanley (1963), o método de pesquisa quase-experimental é uma extensão do teste experimental real, sendo utilizado quando não é factível uma verdadeira randomização da população alvo. Ainda segundo os autores, o procedimento é oportuno quando se busca evidências da aplicabilidade da solução em detrimento de provar com exatidão a teoria. Por esse motivo, a generalização dos resultados fica limitada, mas abre caminhos para entender os cenários estudados.

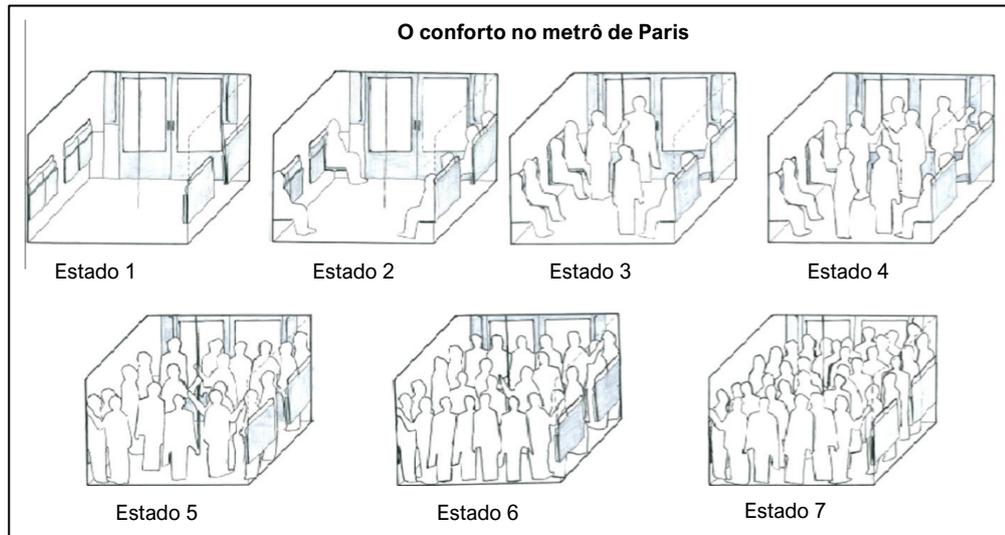
Seguindo os exemplos de Handte et al. (2014) e Dunlap et al. (2016), o protótipo foi introduzido dentro de um veículo do transporte público por ônibus. A coleta de dados se deu através do protótipo descrito nas seções anteriores e através de um formulário de pesquisa visual da ocupação.

A técnica de aferição visual da ocupação é um procedimento de praxe do transporte público, visando a contagem de passageiros e validação local das matrizes de OD (HAYWOOD; KONING, 2015). A técnica consiste em classificar a lotação do carro em estados pré-estabelecidos, baseados na densidade de pessoas percebido pelo pesquisador, como ilustrado através da Figura 8.

O dispositivo escolhido para esta pesquisa é uma adaptação feita pela Companhia de Trânsito de Curitiba, da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) – Norma Brasileira Regulamentadora (NBR) 10985 de 10/1985, descrito por Santana (2015).

⁹ Site para compartilhamento e versionamento de código.

Figura 8 – Classificação da ocupação do carro através da densidade de pessoas



Fonte: Haywood e Koning (2015, p. 188), traduzido pelo autor.

O procedimento foi originalmente desenhado para coletar múltiplas linhas de ônibus, na sua chegada e saída, desde um único ponto de ônibus para diversas linhas (SANTANA, 2015). Aqui, como a coleta é feita em um único carro, utilizou-se o mesmo formulário (ANEXO A) preenchendo apenas a coluna de saída, pois, pressupõe-se que a lotação de chegada é sempre a última saída coletada.

Deste modo, as medidas são recolhidas no momento em que o ônibus fecha as portas e entra em movimento até a próxima parada. A Tabela 4 exhibe todos os 8 níveis de ocupação, sua descrição e um pequeno sumário de como aferi-la.

Tabela 4 – Escala de classificação da ocupação de um veículo e sua definição

Nível	Descrição	Definição
1	Parcialmente sentados	Alguns lugares vazios
2	Sentados	Todos os bancos ocupados
3	25% de ocupação	Todos os bancos ocupados com algumas pessoas em pé
4	50% de ocupação	Meia lotação do corredor
5	75% de ocupação	Lotação de 3/4 do veículo
6	90% de ocupação	Apesar de lotado, observa-se que tem capacidade para atender mais usuários
7	Lotado	Capacidade total utilizada
8	Superlotado	Além da capacidade normal

Fonte: Santana (2015, p. 31).

PAULO, 2006). Segundo o manual da antena, fornecido pelo fabricante, a propagação máxima do sinal é de até 30 m no formato omnidirecional¹⁰, sendo assim, a posição escolhida permite abranger todo o interior do veículo.

3.4 PERÍODO DE COLETA

As medidas foram coletadas durante os dias 29 de novembro de 2017 e 13 de dezembro do mesmo ano, em 7 viagens de ida e volta, durante os dias úteis da semana, em veículos diferentes.

Os dias e horários, listados na Tabela 5, foram escolhidos de forma a contemplar horários de pico e entre pico, porém, com um viés para o primeiro caso visto que é o mais sensível aos efeitos da superlotação. No decorrer do experimento de campo foram coletados 818.961 sinais de requisição de sondagem (PR) e 54.610 pontos de localização geográfica do GPS. Os dados foram disponibilizados *online* através do endereço <https://github.com/hilios/wifi-apc-analysis/tree/master/data>.

Tabela 5 – Planilha de horários em que o experimento foi executado

Data	Sentido	Horário de início	Horário de fim
Qua. 29 de nov. de 2017	Term. Sto. Amaro	07 h 56 min	08 h 41 min
	Term. Bandeira	08 h 56 min	09 h 45 min
Qua. 6 de dez. de 2017	Term. Sto. Amaro	19 h 03 min	20 h 02 min
	Term. Bandeira	20 h 10 min	21 h 23 min
Qui. 07 de dez. de 2017	Term. Sto. Amaro	07 h 56 min	08 h 40 min
	Term. Bandeira	08 h 45 min	09 h 36 min
Sex. 08 de dez. de 2017	Term. Sto. Amaro	19 h 24 min	20 h 35 min
	Term. Bandeira	21 h 01 min	22 h 21 min
Seg. 11 de dez. de 2017	Term. Sto. Amaro	08 h 26 min	09 h 18 min
	Term. Bandeira	09 h 23 min	10 h 18 min
Ter. 12 de dez. de 2017	Term. Sto. Amaro	19 h 13 min	20 h 15 min
	Term. Bandeira	20 h 28 min	21 h 38 min
Qua. 13 de dez. de 2017	Term. Sto. Amaro	12 h 57 min	13 h 55 min
	Term. Bandeira	14 h 03 min	14 h 56 min

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

¹⁰ O sinal é transmitido igualmente em todas as direções (BHASKAR; CHUNG, 2013).

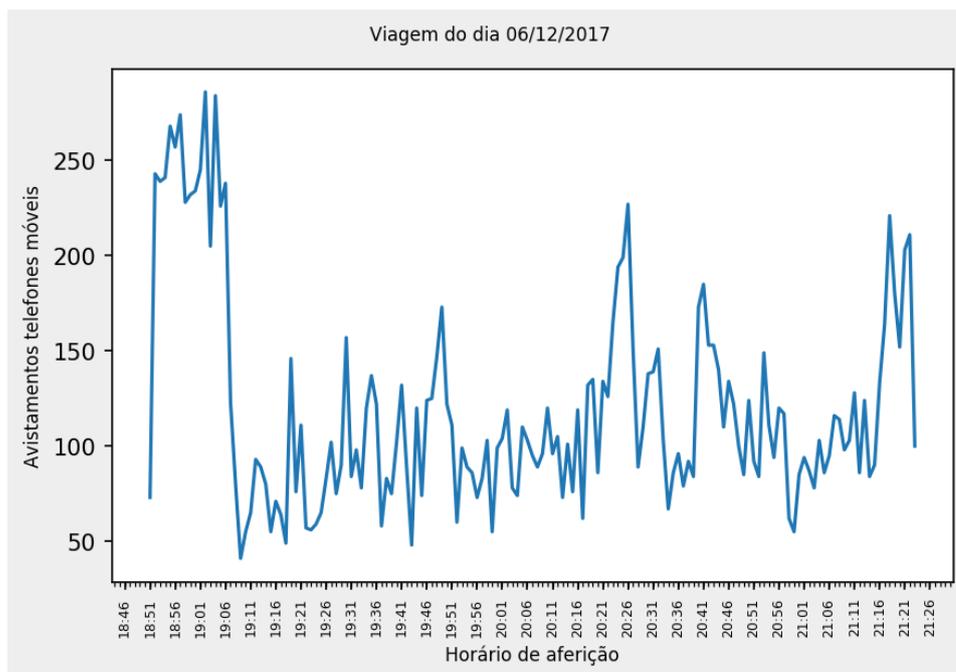
3.5 ALGORITMO DE ESTIMATIVA DA OCUPAÇÃO

A heurística utilizada para detectar o telefone móvel de passageiros, com dispositivos que estão dentro do veículo, parte da preposição que os sinais destes serão avistados por um período maior de tempo daqueles que não estão embarcados (HANDTE et al., 2014; ORANSIRIKUL et al., 2016; DUNLAP et al., 2016). Diferentemente de outras pesquisas, propõe-se um algoritmo iterativo através de uma janela de tempo deslizante, para obter a ocupação o mais próximo ao tempo real.

A ideia da janela deslizante é similar a uma média móvel, onde a cada iteração se aplica uma função num subconjunto finito do espaço amostral. Assim, coleta-se todos os avistamentos de PR, no raio da antena, durante um intervalo de tempo definido e executa-se o algoritmo de estimativa da ocupação. Esse processo então é repetido em passos constantes e sequenciais, durante todo o trajeto do ônibus.

Igualmente, o método serve para suavizar o ruído característico e inerente dos sinais digitais (ver Gráfico 2), pois, como afirmam Watanabe, Mizuno e Makino (2003), a média móvel possui o efeito de um filtro passa-baixa eliminando os valores extremos de um conjunto de dados.

Gráfico 2 – Contagem simples de dispositivos móveis durante uma corrida

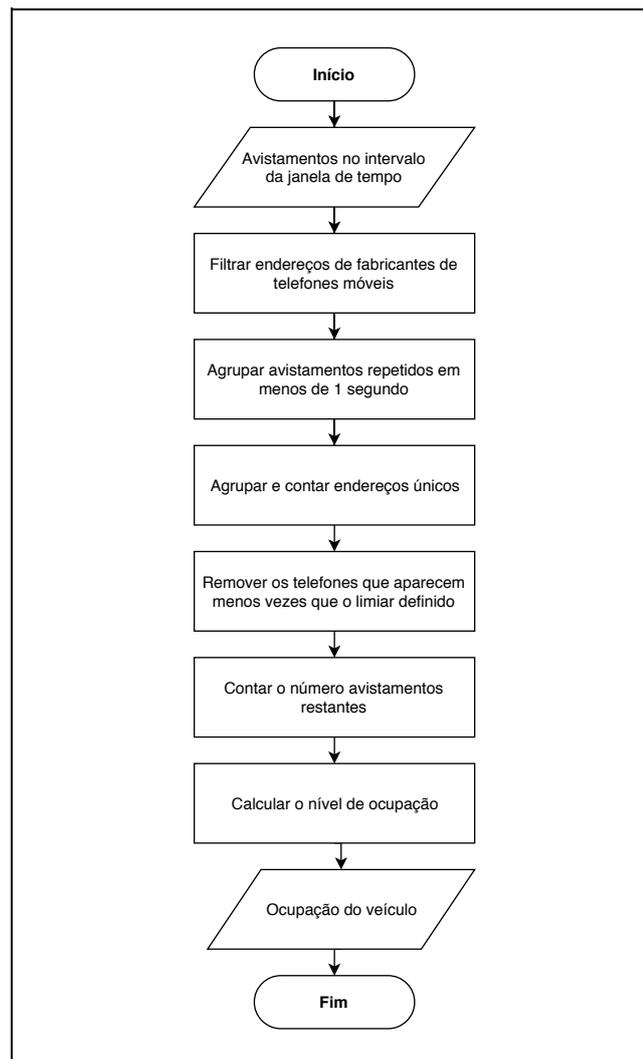


Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Por fim, um benefício do método aplicado é que ele não precisa do estado da ocupação passada para a aferição da atual. Isso significa que não há a propagação de erros ocasionados por uma eventual leitura incorreta, assim como relatados para os APCs por infravermelho e por processamento de imagens (NIELSEN et al., 2014).

Definido o conjunto de dados a ser analisado, então, aplica-se o algoritmo com a heurística de inferência do passageiro. A ideia geral é distinguir os passageiros embarcados dos transeuntes, a partir da quantidade de avistamentos dentro dos dados coletados. O processo, ilustrado através da Figura 9, é uma sequência de operações de filtragem, agregações e contagem que por fim tem como resultado a ocupação relativa do veículo. Cada passo desta sequência será discutido durante o decorrer desta seção.

Figura 9 – Fluxograma das etapas do algoritmo de estimativa da ocupação



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

3.5.1 Filtro de telefones móveis

Durante o processo de aquisição do sinal de PR não há como distinguir aqueles que foram emitidos por telefones de outros dispositivos móveis como *notebooks* e *tablets*, por exemplo. Portanto, o primeiro passo do algoritmo é distinguir os avistamentos dos celulares e descartar o resto.

Através da revisão da literatura viu-se que os primeiros 24 bits do endereço MAC são atribuídos a um único fabricante (INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, 2017) que podem ser decodificados no nome da empresa através de uma lista *online* pública, com a identificação da companhia com base nesse prefixo (INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, 2018). À vista disso, utilizaram-se os dados sobre o mercado brasileiro para selecionar as principais empresas que produzem telefones celulares (STATCOUNTER, 2018) e coletar os 3.040 prefixos utilizados por elas.

Então, para cada elemento no conjunto de dados avistados, são verificados se os três primeiros octetos do endereço MAC constam na lista de fabricantes selecionada anteriormente. Em caso afirmativo esse avistamento é considerado para o procedimento seguinte, caso contrário ele é excluído da análise.

3.5.2 Agrupamento e aplicação do limiar mínimo

O primeiro problema de agrupamento se dá pela característica do protocolo IEEE 802.11 possuir diversos canais de comunicação dentro dos limites da frequência (INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, 2016). Conseqüentemente, um dispositivo que deseja descobrir as redes disponíveis ao seu redor, deve enviar um PR para cada um desses canais.

Se viu através dos dados coletados que um mesmo endereço aparece repetidamente num espaço muito curto de tempo. Assim optou-se por agrupar os endereços que aparecem num intervalo de tempo muito pequeno entre eles (menor que 1 segundo). Essa ação simplifica os cálculos posteriores e aumentado a eficiência computacional.

Finalmente, conta-se quantas vezes cada endereço foi encontrado dentro da janela, onde cada avistamento é garantido ser um telefone celular. Todavia, para

determinar se é um passageiro ou não se volta mais uma vez a heurística definida no início dessa seção. Segundo o relato de Dunlap et al. (2016), cada passageiro embarcado é avistado em média a cada 20s, assim, pressupõe-se que seus dispositivos móveis irão aparecer com maior frequência nos dados adquiridos.

Desta maneira, exclui-se da análise aqueles avistamentos que não aparecem uma quantidade mínima vezes. Para determinar o limiar mais adequado para o algoritmo, se utilizou de um método de minimização dos erros, descrito na próxima seção.

3.5.3 Contagem de passageiros e cálculo da ocupação do veículo

A quantidade de passageiros é dada pela contagem do número dos endereços MAC que sobraram no conjunto ao final do processamento dos dados. Para se obter a lotação do veículo, utiliza-se a fórmula:

$$\frac{\text{número de passageiros}}{\text{capacidade do veículo}}$$

O resultado final pode ser definido como a proporção de passageiros dentro do veículo.

Logo, a solução precisa ser traduzida em termos dos níveis de ocupação da pesquisa visual, para que possam ser comparados. A partir da descrição fornecida por Santana (2015), cada estado foi classificado para abranger os percentuais fornecidos pela saída do algoritmo. Os limites utilizados podem ser vistos na Tabela 6.

Tabela 6 – Mapeamento dos níveis de ocupação de pesquisa visual com a saída do algoritmo

Nível	Descrição	Saída do algoritmo	Estim. de passageiros
1	Parcialmente sentados	< 15%	Até 26 pessoas
2	Sentados	≥ 15% e < 25%	Até 43 pessoas
3	25% de ocupação	≥ 25% e < 40%	Até 70 pessoas
4	50% de ocupação	≥ 40% e < 60%	Até 104 pessoas
5	75% de ocupação	≥ 60% e < 80%	Até 139 pessoas
6	90% de ocupação	≥ 80% e < 90%	Até 156 pessoas
7	Lotado	≥ 90% e < 100%	Até 174 pessoas
8	Superlotado	≥ 100%	Mais que 174 pessoas

Fonte: Adaptado de Santana e elaborado pelo autor (2015, p. 31).

Vê-se que o sensoriamento por Wi-Fi é uma forma indireta de calcular a contagem de passageiros, por isso apenas provê uma estimativa aproximada da contagem de passageiro (NIELSEN et al., 2014). Por esse motivo, é mais útil interpretá-lo como o estado da lotação ao invés da contagem discreta e exata de pessoas. Não obstante, Aguiléra et al. (2014), afirma que tal informação mesmo sem tanta precisão, ainda é útil tanto para os operadores quanto para os passageiros que estão mais interessados.

Igualmente, Wang, Attanucci e Wilson (2011) sustentam que um processo que pode ser repetido diariamente, baseado em diferentes horários e dias da semana, mesmo que seja estimado, ajuda a esclarecer a variabilidade nas viagens. Provendo, dessa forma, uma maneira mais simples de obter detalhes do comportamento dos passageiros, se comparado ao processo manual.

3.6 DEFINIÇÃO DAS VÁRIAVEIS

Finalmente, estabelecido o processo do algoritmo, falta definir as variáveis propostas ao longo desta seção, nomeadamente: o tamanho da janela deslizante, o passo de aplicação do algoritmo e o número mínimo de vezes que o sinal precisa ser avistado para se considerar um passageiro. Para determinar o intervalo da janela e o passo utilizaram-se, como referência, os próprios dados obtidos durante o experimento.

Verificou-se que o tempo de viagem entre uma parada e outra, é em média de 3 min e 14 seg, o menor valor é 1 min e 2 seg e o maior valor encontrado é de 9 min e 32 seg. Por outro lado, o veículo fica estacionado, em cada ponto de parada, por menos de 1 min para o embarque e desembarque de passageiros. Assim, se definiu o intervalo da janela em 5 min, contemplando os viajantes que ficam embarcados por pelo menos duas paradas, e o passo de 1 min para aferição da ocupação como o menor tempo possível, considerando o embarque e desembarque.

A última variável do algoritmo, que ainda resta uma explicação, é o número de avistamentos que o mesmo endereço deve ter para ser considerado como um passageiro. Para este fim, buscou-se o valor que minimiza a variância entre a medição feita pelo sensor (observado) por aquela observada através pesquisa visual (esperado), empregando o cálculo da **raiz do erro quadrático médio**.

Willmott e Matsuura (2005) explicam que esse método é uma análise de variância amplamente utilizado para testar a performance de modelos preditivos por meio de um estimador quantitativo (θ). Permitindo medir objetivamente o quão bem ajustado é o dado observado em relação ao esperado, em função do desvio padrão dos resíduos¹¹. A aplicação do dispositivo e determinação do valor que melhor se ajusta ao experimento é discutido mais adiante, no próximo capítulo.

3.7 ANÁLISE DO EXPERIMENTO

Os métodos foram escolhidos considerando o tipo de dado coletado. Os testes que mais se compatibilizam com a escala nominal são os testes não-paramétricos. Segundo Siegel e Castellan (2008), os testes não paramétricos dispensam a suposição da distribuição seguir a curva de Gauss. Portanto, conseguem tratar dados categóricos, além de serem mais adequados quando a amostra é pequena.

Abaixo, são apresentados os parâmetros e as técnicas empregadas para o tratamento estatístico, assim com as respectivas hipóteses consideradas:

a) Qui quadrado (χ^2) de aderência: é um teste de hipóteses, adequado a questões categóricas ou classificatórias, como as questões nominais (definem um atributo à um elemento). O método testa se a amostra possui uma diferença significativa entre os valores esperados e observados, estabelecendo correspondência entre eles (SIEGEL; CASTELLAN, 2008). As hipóteses geradas por este teste são:

H₀: A distribuição de probabilidades ocorrida (observada) não é a mesma da distribuição esperada, segundo suposições baseadas na teoria.

H₁: A distribuição de probabilidades ocorrida (observada) é a mesma da distribuição esperada, segundo suposições baseadas na teoria.

Para interpretar o teste de hipótese calcula-se o valor-P, definido como a probabilidade de assumir H₀ como verdadeira. Se o valor calculado for menor que o nível de significância adotado, rejeita-se a hipótese nula em favor da alternativa, caso o contrário, não há evidências suficientes para negá-la e não pode-se chegar a nenhuma conclusão (MONTGOMERY; RUNGER, 2009).

¹¹ O resíduo é o resultado da subtração do dado observado pelo esperado num mesmo instante.

Outra forma de análise é a descritiva por meio de gráficos. Além da utilização do gráfico em pizza para representar as proporções dos dados coletados (SPENCE, 2005) e o gráfico de barras para ilustrar dados categóricos (KELLEY; DONNELLY, 2009), foi utilizado o:

b) Boxplot: ou diagrama de caixas, que descreve simultaneamente várias características dos dados de forma condensada, como centro, dispersão, simetria e possíveis pontos fora da curva (*outliers*), como descrevem Montgomery e Runger (2009). Tal ferramenta é útil quando se usa escalas ordinais.

Igualmente, através dos dados obtidos pelo GPS, é possível realizar uma análise geográfica do efeito da ocupação no entorno urbano (LIU et al., 2013) e a visualização da matriz de OD local do campo amostral (WANG; ATTANUCCI; WILSON, 2011). A seguir são apresentados os tipos de mapas utilizados:

c) Mapas de trajetória: apresenta a trajetória de um veículo, conectando os pontos geográficos presentes na amostra (LIU et al., 2013). O comprimento das linhas representa a distância percorrida e a cor do traço a sua ocupação. As linhas se tornam mais largas e com cores mais quentes à medida que a ocupação aumenta, gerando o perfil do carregamento durante o trajeto.

d) Mapas de densidade: utilizado para mostrar o efeito agregado de um conjunto de dados em relação a uma posição geográfica no formato de uma matriz (LIU et al., 2013). Quanto mais quente a cor utilizada, maior é a densidade de passageiros naquela região. Esse método foi utilizado para visualizar a matriz de origem e destino da linha em diferentes situações operacionais.

3.8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Como apresentado no início deste capítulo, foi possível criar um APC para capturar o sinal de PR do protocolo Wi-Fi e pontos de localização geográfica do GPS, a um custo baixo, utilizando apenas componentes eletrônicos disponíveis no varejo. Através de uma combinação de programas *open-source* e outros desenvolvidos exclusivamente para o protótipo, os dados foram salvos em arquivos de texto para processamento a posteriori e para prover informações em tempo real da lotação e da latitude, longitude e velocidade do veículo.

O dispositivo foi localizado estrategicamente no centro do veículo, próximo a sanfona, para que o sinal da antena abrangesse todo o interior do ônibus. Sua instalação também é bem mais simples, quando comparado aos sistemas de infravermelho, por peso e baseado em câmeras. Já a calibração do sistema depende apenas dos dados operacionais da própria linha, dispensando uma manutenção complicada e evitando erros ocasionados por condições climáticas e ambientais, assim como os relatados em outros APCs (BALTES; REY, 1999; MOORE; GIULIANO; MARCH, 2002; PERNG et al., 2016).

Logo, um experimento de campo foi executado na cidade de São Paulo, no decorrer de 7 dias em horários e dias da semana distintos, totalizando 13h e 36 min de duração das viagens da linha 6500-10 Term. Sto. Amaro – Term. Bandeira. Observou-se que uma grande quantidade de dados foi armazenada, apesar do espaço amostral limitado, assim como indicado através da literatura (CALABRESE et al., 2011).

De outra forma, a informação da ocupação também foi registrada a partir de um formulário de ocupação visual (SANTANA, 2015) e utilizado como instrumento de calibração do algoritmo proposto na seção 3.5. Ainda que tal procedimento não seja o mais confiável, na falta de informações do carregamento da linha, torna-se uma estratégia alternativa para operações que não possuem um dispositivo de contagem de passageiros, como a encontrada na capital paulistana.

Diferentemente dos exemplos de sensoriamento Wi-Fi, citados na revisão bibliográfica, aplicou-se um método de janela deslizante com o objetivo de possibilitar o cálculo da estimativa da lotação durante o percurso da viagem. Visando a criação de um sistema de informação com dados atualizados no menor tempo possível tanto para os usuários quanto para os operadores do TP (HENDREN et al., 2015).

O algoritmo tem como premissa principal que o telefone celular de um passageiro é avistado por um período maior de tempo do que outros dispositivos móveis. Isto posto, foram descritos os passos necessários para expurgar os avistamentos que não se adequam aos critérios definidos pela heurística de determinação do passageiro. Traduzindo o resultado final, mesmo que de forma aproximada, para uma escala classificatória dos níveis de ocupação do veículo – de vazio a sobrecarregado – que são comumente utilizados por operadores do TP (HAYWOOD; KONING, 2015).

Por fim, foram apresentados nas seções 3.6, recursos empíricos para a determinação dos parâmetros da janela deslizante, baseados nos tempos que o ônibus demora para percorrer cada parada. Para a escolher o número mínimo de avistamentos necessários optou-se por uma técnica de análise de variância, para selecionar o valor que mais se ajusta aos dados observados pela pesquisa visual.

Finaliza-se a descrição do método apresentando as ferramentas estatísticas para estimar a acurácia do algoritmo em face aos dados reais da ocupação, assim como as visualizações cartográficas, que serão mostradas no próximo capítulo, mais pertinentes para a geração das matrizes de OD, a partir do dado do carregamento da linha. Definindo um modelo tanto quantitativo quanto qualitativo para a análise dos resultados experimentais.

4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

O processamento e a análise estatística de dados se deu com o uso do Jupyter Notebook (JUPYTER DEVELOPMENT TEAM, 2018), um software de tratamento de dados, e para a análise espacial utilizou-se o QGIS (QGIS DEVELOPMENT TEAM, 2018), um sistema de informações geográficas (SIG). Partindo dos dados coletados, o algoritmo foi aplicado utilizando técnicas da *Structured Query Language* (SQL) e seus resultados analisados utilizando as ferramentas descritas na seção 3.7.

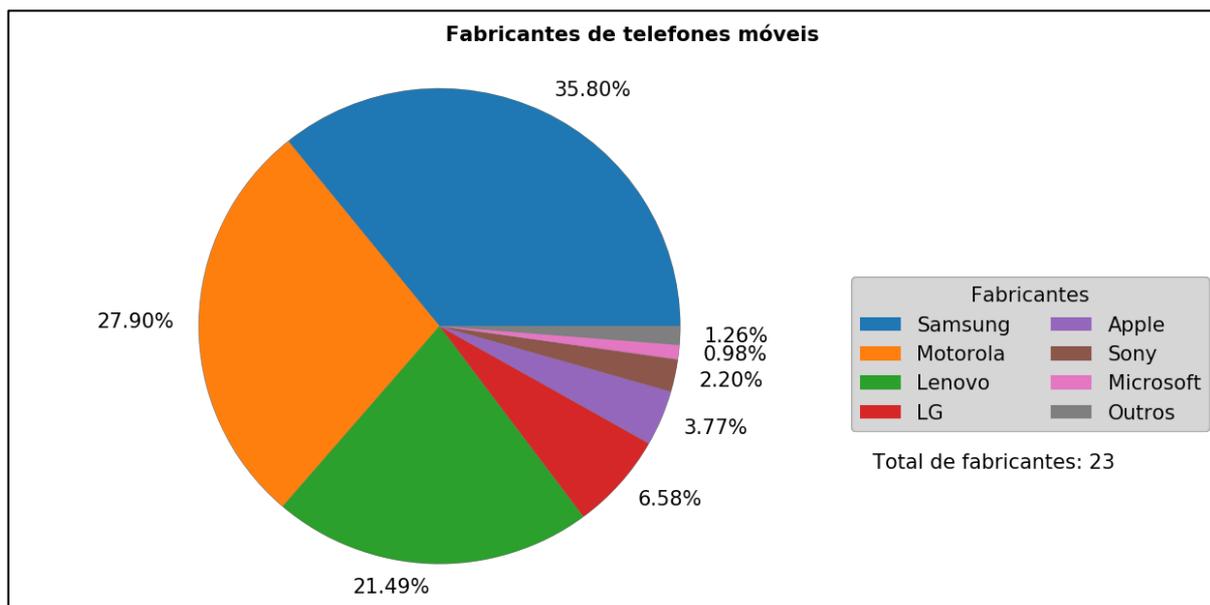
4.1 VALIDAÇÃO DA AMOSTRA

A amostra coletada não é probabilística, isto é, não é completamente aleatória. Entretanto, teve-se o cuidado de torná-la criteriosa, como sugerem Bolfarine e Bussab (2007). Este tipo de amostragem consiste na seleção de critérios objetivos para selecionar os indivíduos, que foram definidos na elaboração da coleta de dados.

Ainda segundo os autores, uma forma de reduzir o erro amostral neste cenário é através da comparação dos valores obtidos com os valores reais da população alvo, caracterizando a sua semelhança e evitando possíveis falhas do processo de coleta. Este procedimento será realizado com o teste qui quadrado de aderência a um nível de significância adotado de $\alpha = 5\%$, por sua ampla aceitação para as áreas de engenharia (MONTGOMERY; RUNGER, 2009).

Segundo a Statcounter (2018) o *market share* dos fabricantes de celular no Brasil em dezembro de 2018 foi: na liderança a Samsung com 42,59%, seguido pela Motorola com 19,62%, LG com 13,24% e Apple com 9,68%, outros fabricantes somam 14,87%. Aplicou-se o teste com os dados obtidos (ver Gráfico 3) e se obteve o valor- $P = 0,00457$, valor menor que o α definido, acarretando rejeição da hipótese nula, indicando que a amostra segue distribuição esperada da população.

Gráfico 3 – Proporção dos avistamentos por fabricantes de telefones móveis



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

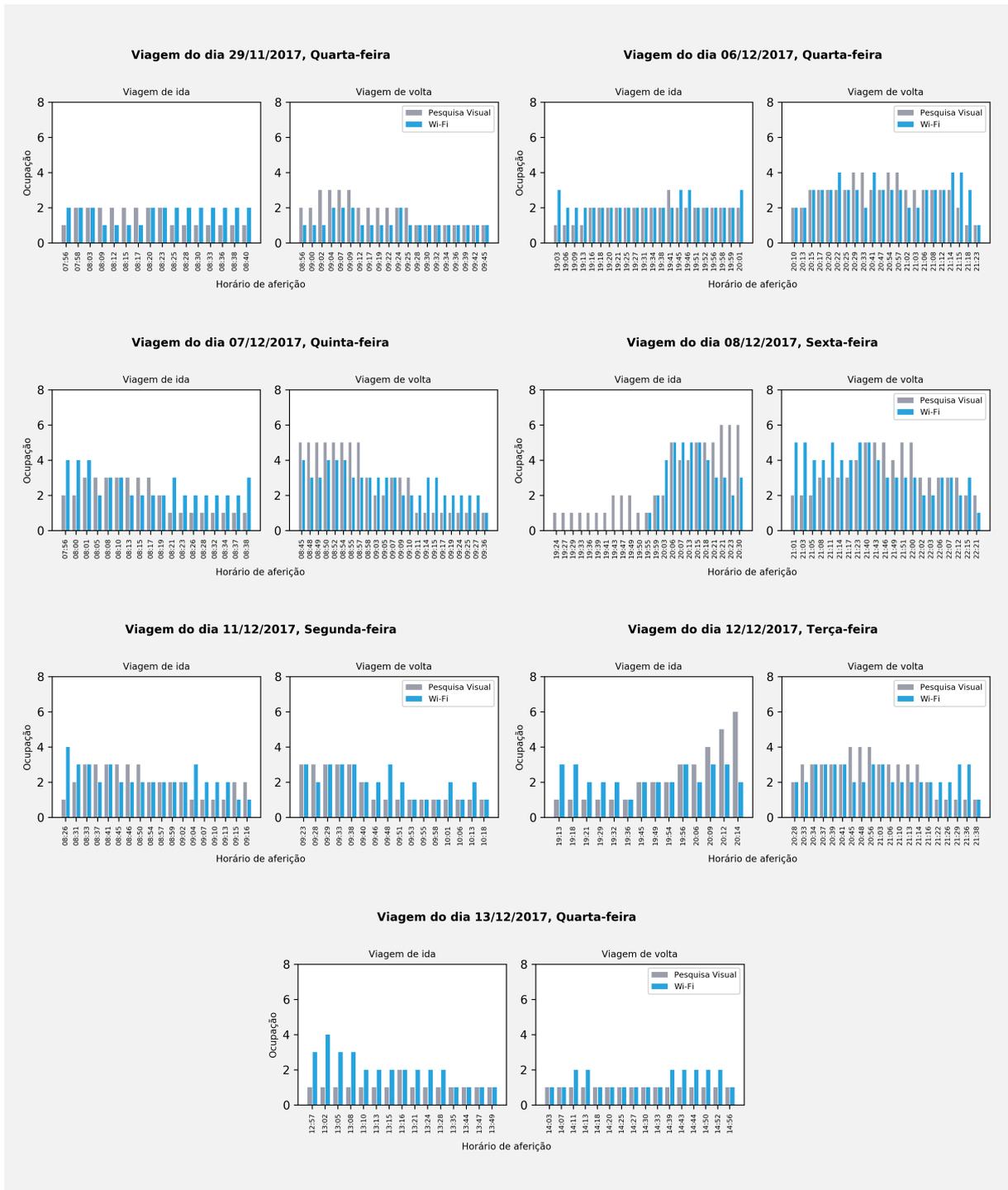
4.2 ACURÁCIA DO ALGORITMO

Como apresentado no capítulo anterior, o algoritmo de cálculo da ocupação utiliza uma janela de tempo deslizante de 5 min para coletar os sinais de PR emitidos na área de cobertura da antena e intervalo de 1 min entre cada aplicação do algoritmo, para determinar o nível de ocupação do veículo naquele instante.

Uma característica do experimento, em relação à pesquisa visual, é que a primeira resulta em medições muito mais frequentes, comparado com a segunda. Portanto, para correlacionar os dois conjuntos de dados, utilizou-se a última medição, feita de forma automática, mais próxima ao horário da medição manual, partindo do pressuposto que a ocupação do veículo não muda entre uma parada e outra. O resultado final dessa associação pode ser visualizado através do Gráfico 4.

Através do gráfico de barras pode-se fazer uma comparação visual dos dados observados (sensor Wi-Fi) com os esperados (pesquisa visual). Observa-se que, salvo alguns instantes pontuais, as flutuações de ambos os conjuntos de dados parecem seguir a mesma tendência, para as diferentes lotações observadas durante o decorrer do experimento.

Gráfico 4 – Comparação entre os dados observados pelo Wi-Fi com os esperados pela pesquisa visual



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

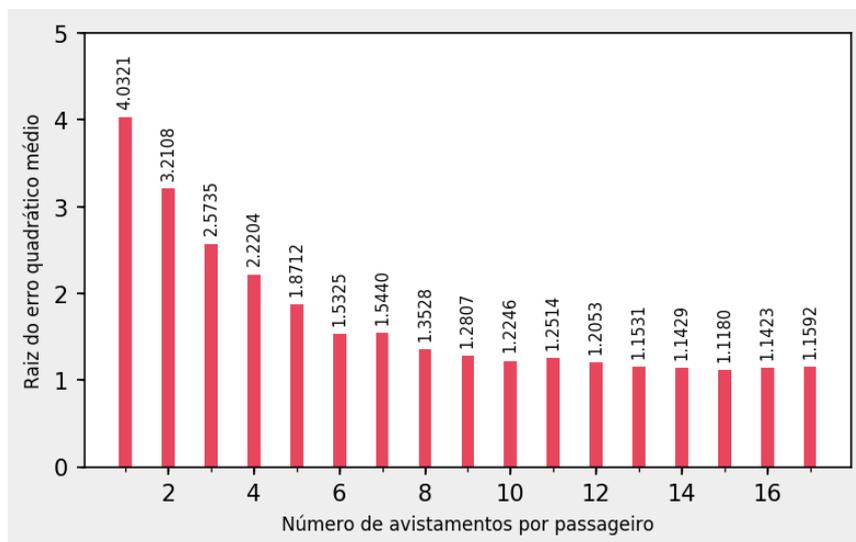
4.2.1 Análise de variância

A última variável do algoritmo que resta definir é o número de avistamentos que o mesmo endereço deve ter para ser considerado como um passageiro. Para este fim,

buscou-se o valor que minimiza a variância entre a medição feita pelo sensor por aquela observada através pesquisa visual.

Foi utilizado o método da raiz do erro quadrático médio para investigar a disparidade do modelo calculado pelo algoritmo, para cada número de avistamentos de passageiro feita pela técnica manual. Observa-se através do Gráfico 5 que os valores decrescem à medida que se aumenta o número mínimo de avistamentos, uma indicação de que a premissa adotada na heurística de detecção de passageiro – que esses devem ter mais avistamentos que os demais – é verdadeira.

Gráfico 5 – Análise de variância dos limiares do número de passageiros



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

O ponto encontrado que minimiza o erro quadrático – ou seja, tem o melhor ajuste ao modelo – é de ao menos 15 avistamentos de um único endereço, resultando num estimador $\theta = 1,1180$. Percebe-se que a partir de 13 avistamentos a variância parece atingir um platô, apresentando diferenças muito pequenas entre um valor e outro. Porém, se verificou que o valor selecionado também aumenta a aderência do algoritmo, levando a menos amostras serem descartadas pelo teste de hipótese.

Outra análise que se pode retirar desta leitura é que o algoritmo erra, em média, um nível de ocupação para cima ou baixo, o que significa uma incerteza de aproximadamente ± 22 passageiros, calculado a partir da média de passageiros contemplados em cada nível de ocupação (exibidos na Tabela 6). Por este ponto de

vista, percebe-se que é uma performance pior, mas próxima, aos sensores baseados por peso (NIELSEN et al., 2014), anteriormente citado: 10 a 15 pessoas.

4.2.2 Análise de aderência

Uma outra forma de verificar a acurácia do algoritmo é através da comparação de suas distribuições. Novamente, foi utilizado o teste qui quadrado de aderência, com um nível de significância $\alpha = 20\%$, para buscar evidências que o comportamento observado pelo Wi-Fi segue o mesmo padrão esperado dado pela pesquisa visual.

Apesar do α definido não ser muito comum, Lee e Koval (1997) recomendam $15\% \leq \alpha \leq 20\%$ como ponto de partida para o teste χ^2 , quando o objetivo é testar a acurácia de modelos preditivos. Igualmente, Labovitz (1968) explica que a sua escolha deve considerar fatores além da rigidez estatística, admitindo valores maiores quando há poucas ou nenhuma evidência sobre a teoria estudada e suas consequências práticas não são tão graves. Como o caso apresentado nesta pesquisa.

Tendo em mente essas considerações, o teste de hipótese foi aplicado para cada trecho de todas as viagens realizadas, conforme apresentado na Tabela 7. Observa-se que o valor-P em 11 das 13 viagens é menor que o α adotado, indicando que há evidências para rejeitar a hipótese de não aderência, levando a conclusão que em 85% dos casos o sensor foi capaz de detectar a lotação do veículo com a mesma precisão da pesquisa visual.

Tabela 7 – Teste χ^2 de aderência dos dados observados e esperados para cada viagem

Data	Sentido	χ^2	Valor-P	Rejeita H_0
Qua. 29 de nov. de 2017	Term. Sto. Amaro	0,0762	0,0762	Sim
	Term. Bandeira	0,1368	0,1368	Sim
Qua. 6 de dez. de 2017	Term. Sto. Amaro	4.3333	0,0000	Sim
	Term. Bandeira	7.0833	0,1233	Sim
Qui. 07 de dez. de 2017	Term. Sto. Amaro	6.1667	0,0068	Sim
	Term. Bandeira	18,3333	0.0871	Sim
Sex. 08 de dez. de 2017	Term. Sto. Amaro	N/D	N/D	N/D
	Term. Bandeira	13,7667	0,7193	Não

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

(continua)

Tabela 7 – Teste χ^2 de aderência dos dados observados e esperados para cada viagem (continuação)

Data	Sentido	χ^2	Valor-P	Rejeita H_0
Seg. 11 de dez. de 2017	Term. Sto. Amaro	9,4167	0,0411	Sim
	Term. Bandeira	3,8333	0,0078	Sim
Ter. 12 de dez. de 2017	Term. Sto. Amaro	14,3333	0,8425	Não
	Term. Bandeira	10,5000	0,1615	Sim
Qua. 13 de dez. de 2017	Term. Sto. Amaro	9,2500	0,0295	Sim
	Term. Bandeira	3,5000	0,0010	Sim

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Por outro lado, na sexta-feira, dia 8 de dezembro, não foi possível obter o mesmo resultado. Na viagem de ida o sensor Wi-Fi apresentou uma falha e parte dos dados não foram coletados, sendo retirada essa amostra da análise. Já na viagem de volta, apesar do sensor ter coletado dados, obteve-se o valor-P = 0.7193, maior que o nível de significância escolhido. Aqui, não se sabe se o erro de leitura anterior teve algum impacto no restante das medidas, por que, no decorrer da viagem de volta o comportamento parece ter se estabilizado.

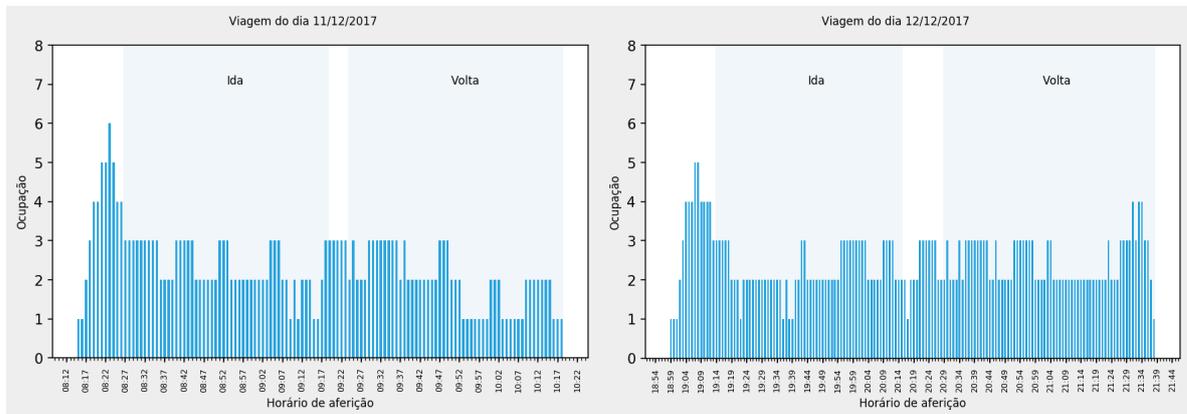
Finalmente, o último caso que não se pode rejeitar a hipótese nula foi na terça-feira, 12 de dezembro, com um valor-P = 0.8425. Neste caso, o maior descolamento ocorre no início da viagem e parece ser derivado do efeito do cálculo da ocupação quando o veículo ainda está no terminal. Já no final da viagem, percebe-se que houve um aumento da ocupação nas últimas paradas, e credita-se esse erro à latência inerente do sensor comparado ao método visual, uma vez que esse reage mais lentamente que o primeiro.

Observa-se através do Gráfico 6, que durante o período de espera para o início da viagem, o sensor acaba sendo estimulado por viajantes de outras linhas, esperando por seus ônibus e acaba por superestimando a ocupação. Esse efeito demora alguns minutos para se diluir e estabilizar, especialmente por que no começo da viagem os pontos são muito próximos uns dos outros, reduzindo a performance do experimento.

Nenhuma solução foi aplicada para determinar quem está embarcado no veículo sob estas condições e, tampouco, a heurística adotada previu tal circunstância.

A alternativa sugerida é ignorar completamente os dados coletados antes do ônibus sair do terminal e buscar outros métodos para aferir a ocupação na hora da saída.

Gráfico 6 – Cálculo da ocupação pelo sensor Wi-Fi incluindo as medições antes do início da viagem



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Não obstante, nos demais casos o protótipo de contagem automática de passageiros por Wi-Fi foi capaz de detectar a mudança da ocupação durante o trajeto da linha. Viu-se que mais da metade da amostra de referência obteve um valor-P menor que 0.05, sugerindo que com um maior refinamento da técnica descrita aqui, talvez seja possível ajustar ainda mais o algoritmo para todos os casos.

Igualmente, diferentes valores de janelas foram experimentados de forma empírica como 3 min, 4 min e 6 min. Viu-se que quanto menor o intervalo de tempo menos passageiros são detectados, afetando principalmente os níveis de ocupação mais altos. Por outro lado, alargar o intervalo também aumenta a quantidade de memória utilizada para processar o algoritmo, porém, sem nenhum efeito positivo na aderência. Então, optou-se por manter o menor tempo possível.

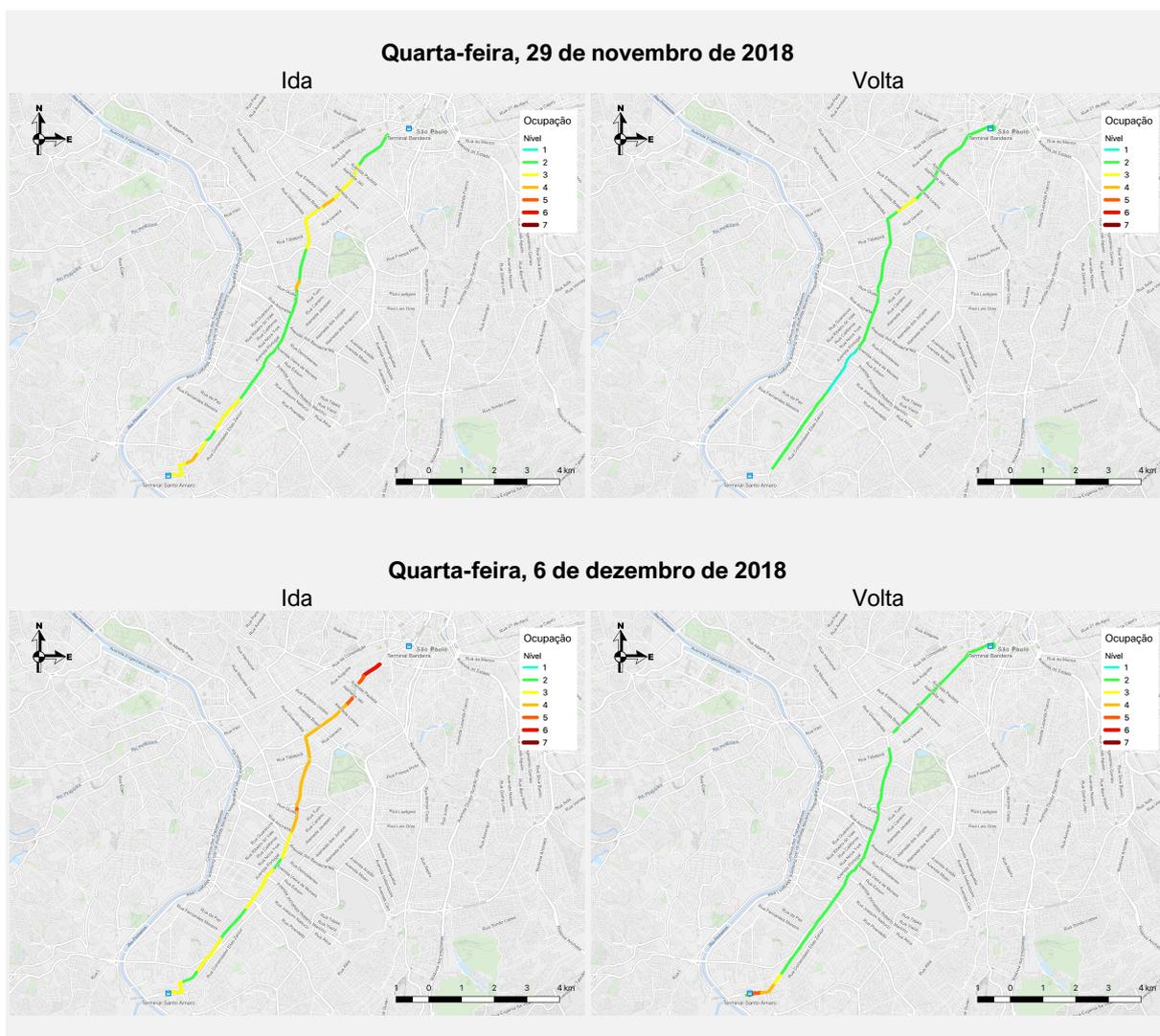
Por último, também se vê que ainda não é possível generalizar a utilização da técnica para toda a operação, justamente por conta do método amostral utilizado por essa pesquisa. Porém, espera-se que o procedimento descrito consiga nortear pesquisas futuras e expandi-lo para outros cenários da operação, como linhas vicinais e outros tipos de veículos, ampliando o conhecimento sobre a contagem automática de passageiros pelo sensoriamento por Wi-Fi.

4.3 ANÁLISE GEOGRÁFICA

Dos dados de GPS coletados em conjunto com os de ocupação foram criados mapas de trajetória com o carregamento da linha (ver Figura 10). Este tipo de visualização é útil para inspecionar o efeito de uma variável durante a rota do veículo, afirmam Liu et al. (2013). A ideia aplicada é que com base na ocupação, pode-se obter uma visão estimada da matriz de origem e destino para uma única viagem e também auxiliar os passageiros com informações em tempo real das condições do veículo.

Segundo Wang, Attanucci e Wilson (2011) as pesquisas de OD usualmente tentam inferir os pontos de embarque e desembarque de um único passageiro, para depois, expandi-la para matrizes mais abrangentes.

Figura 10 – Mapa de trajetória classificados pela ocupação do veículo

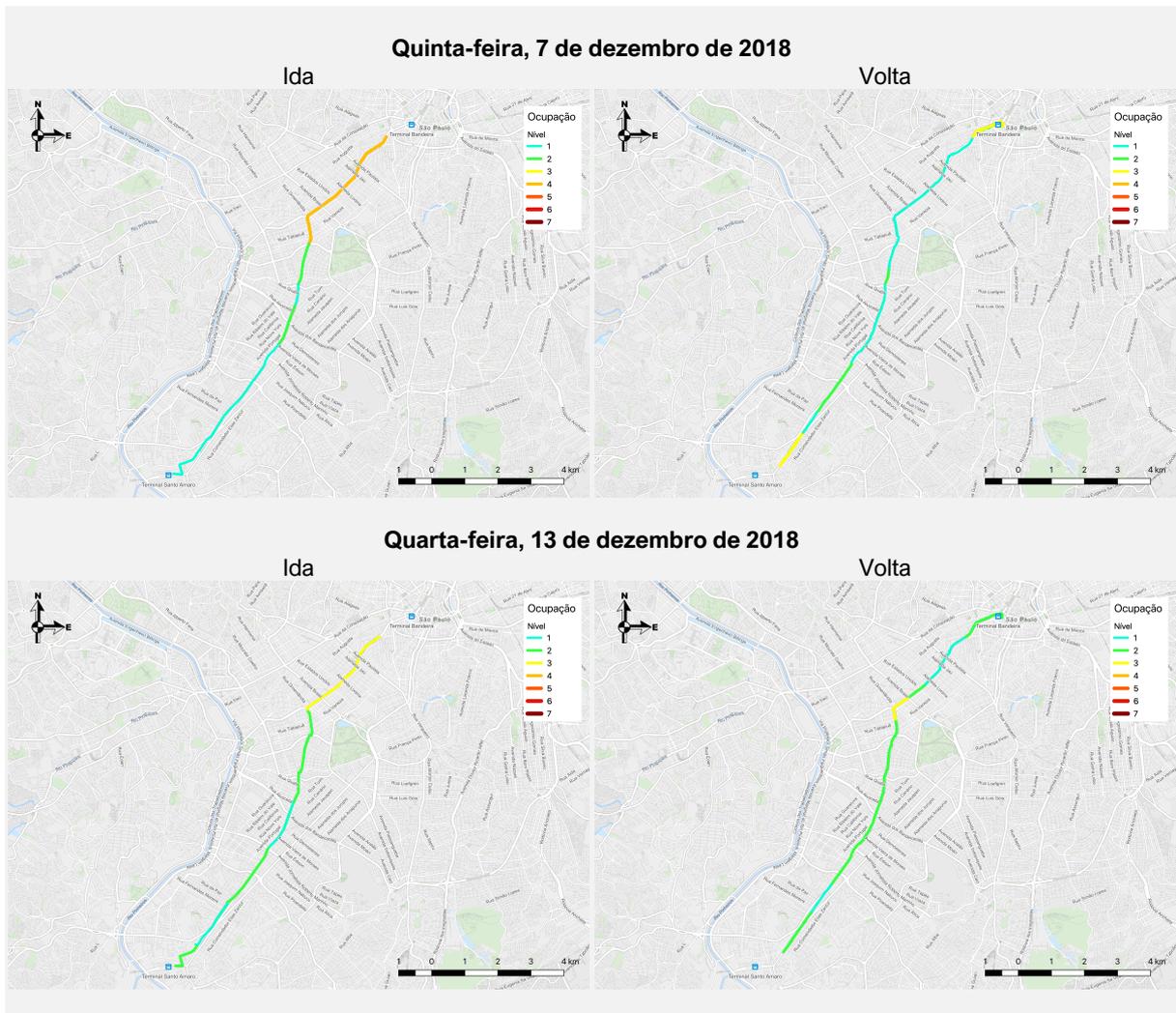


Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

(continua)

Figura 10 – Mapa de trajetória classificados pela ocupação do veículo

(continuação)



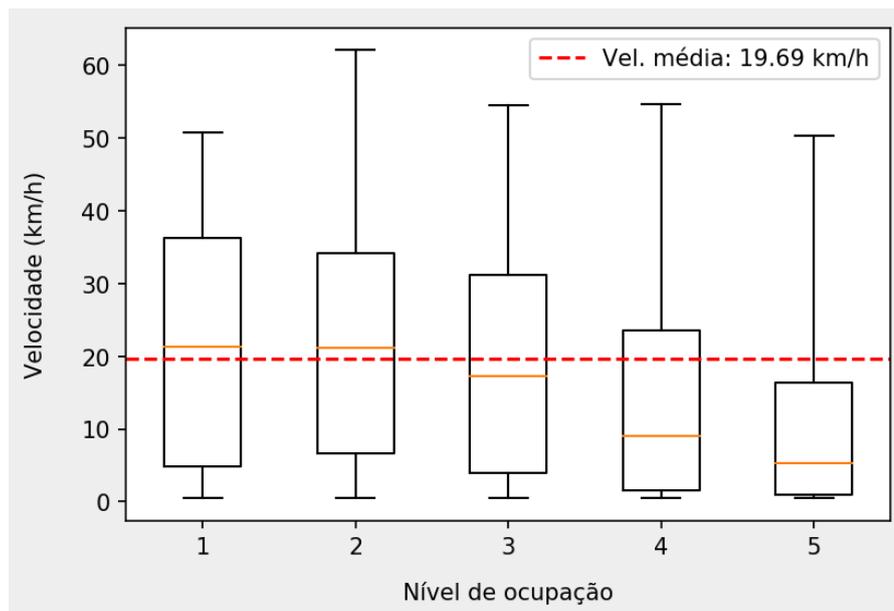
Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Em contraste com esse procedimento, o método de estimativa da ocupação apresentada nesta pesquisa não possui resolução por passageiro, porém, possibilita uma análise visual das regiões que tiveram uma lotação maior ao longo da rota. Permitindo deduzir os pontos onde há mais embarques e desembarques, além de possibilitar sua agregação para expandir a visão da matriz de OD local da amostra.

Similarmente, pode-se verificar o efeito da ocupação observada na velocidade do veículo, apresentado como um diagrama de caixa (ver Gráfico 7). Percebe-se que há uma redução do desvio padrão da velocidade – altura da caixa – à medida que a lotação do veículo aumenta, sinalizando que há uma probabilidade menor do ônibus atingir velocidades maiores quanto maior o nível de ocupação.

A mesma relação também pode ser vista através da moda da velocidade – linha laranja dentro da caixa – que diminui quanto maior a ocupação. Observa-se que quando nos níveis 1 e 2 a moda da velocidade é acima dos 20 km/h enquanto que para os níveis 4 e 5 abaixo dos 10 km/h.

Gráfico 7 – Diagrama de caixa do efeito do nível de ocupação do veículo na sua velocidade durante todas as viagens realizadas.



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Ambas observações indicam que quanto maior a lotação do veículo, este passou circular com uma velocidade menor, efeito esperado de acordo com o observado através da literatura (TIRACHINI; HENSHER; ROSE, 2013). Não obstante, também se viu que a velocidade máxima do veículo, para todos os níveis, é entre 50 km/h e 60 km/h.

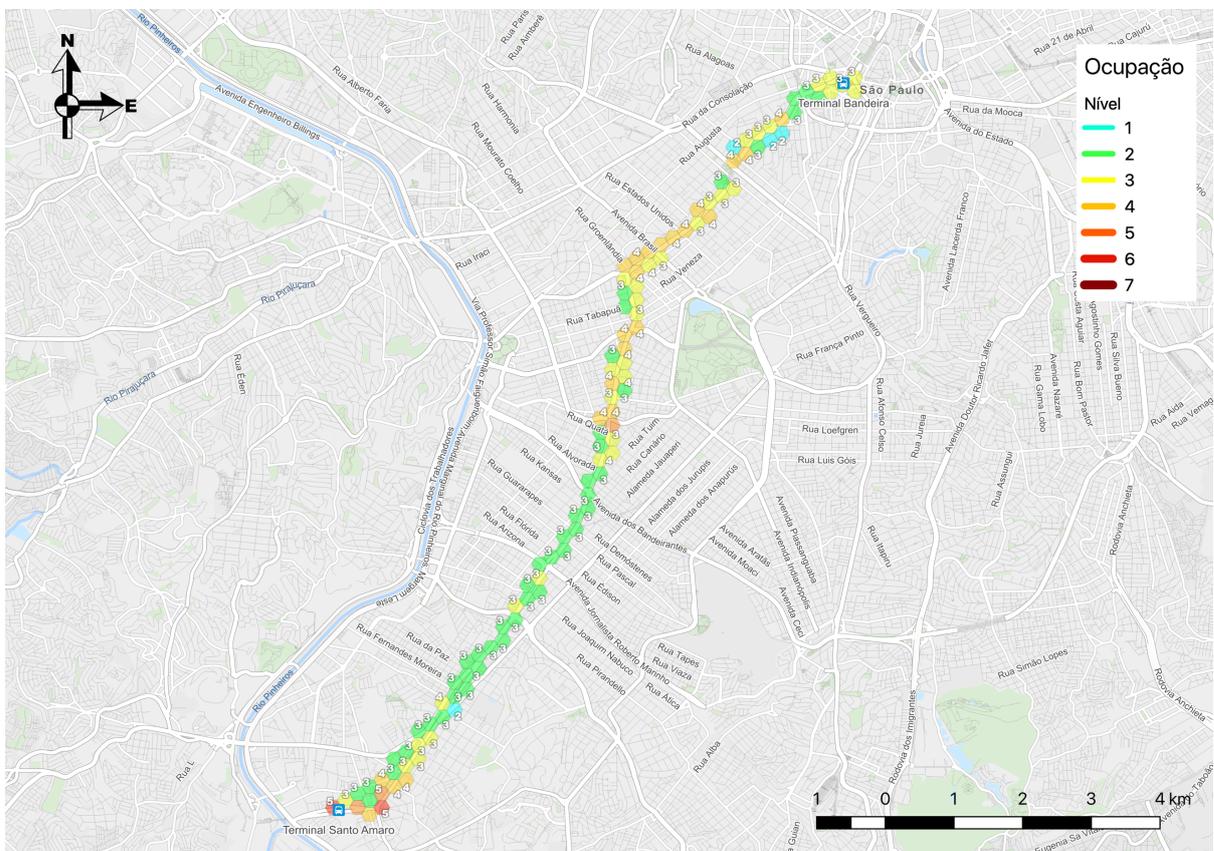
A velocidade média do ônibus durante todas as viagens foi de 19,69 km/h. Valor muito próximo do real de 22,43 km/h informado pela SPTrans (DINIZ; ARCOVERDE, 2018). A diferença entre eles pode ser explicada por conta do viés para o horário de pico adotado na seleção da amostra.

Não é possível afirmar que a ocupação por si só é a única explicação para a redução da velocidade, dado que é apenas uma única variável dentro de um sistema complexo, que conta com outros fatores puramente estocásticos, como o clima, tráfego, sincronização de semáforos e assim por diante. Entretanto, a coleta e

armazenamento de tal informação auxilia na sua correlação com as outras variáveis, ajudando a explicar o seu efeito em face aos demais.

Por fim, afim de se expandir a matriz de origem e destino, utilizou-se de um mapa de densidade com as médias de ocupação, de todas as linhas, em cada seção do trajeto percorrido, representado no mapa por um hexágono (ver Figura 11). O produto final, pode ser considerado uma matriz de OD local, que segundo Wang, Attanucci e Wilson (2011) ajudam a validar as pesquisas de OD tradicionais.

Figura 11 – Mapa de densidade da matriz de origem e destino do sensor Wi-Fi



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Observa-se que o trecho mais carregado, durante o período do experimento, foi entre a região da Avenida Paulista e a Rua Quatá, no bairro da Vila Olímpia. O que parece estar de acordo com a realidade, pois, a primeira é uma região central com fácil acesso a linha de metrô e a segunda uma nova zona comercial que não possui outro tipo de opção de TP além do ônibus.

Igualmente, vê-se na ponta oposta – na região de Santo Amaro, já próximo ao terminal homônimo – que a lotação também aumenta. Provavelmente, por conta de

pessoas indo ou vindo da estação principal, que é um importante centro de ligação com a região extremo sul da cidade de São Paulo, tanto quanto para outras cidades próximas.

Por fim, viu-se que não foi possível coletar os dados de localização de todos os dias do experimento, devido a diversas falhas do componente de GPS. Durante o desenvolvimento do experimento, este foi o componente que mais apresentou falhas (deixou de capturar dados) e por diversas vezes apresentou uma demora superior a 5 min para conseguir fixar o sinal. Assim, recomenda-se em pesquisas futuras utilizar um componente mais confiável, ou relacionar os dados com o sistema de AVL já instalado no próprio veículo.

4.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Levando em conta a natureza dos dados coletados pelo sensor, a amostra foi comparada com informações reais do mercado. Verificou-se que há evidências para acreditar que a proporção dos fabricantes de telefones móveis, dos passageiros identificados pelo protocolo Wi-Fi, é condizente com o esperado para a população brasileira, fornecendo uma indicação da semelhança com o campo amostral coletado.

Por meio da análise de variância, se constatou que o número de avistamentos para a aplicação da heurística de passageiros é de ao menos 15 vezes. Produzindo uma incerteza de aproximadamente ± 1 no nível de ocupação em relação aos dados produzidos pela pesquisa visual, e erro estimado de 13% da ocupação esperada.

Igualmente, viu-se que o erro diminui à medida que se aumenta a quantidade de avistamentos necessários para identificar as pessoas embarcadas no ônibus, corroborando a premissa definida no início. Todavia, há de se ponderar que tal procedimento tende a causar um sobreajuste do modelo, tornando-o ineficaz para utiliza-lo em outros casos. Assim, se faz necessários novos estudos e sua aplicação em diferentes cenários da operação para entender melhor o seu efeito.

Por outro lado, o teste de aderência mostrou que, na maioria dos casos, a técnica de sensoriamento por Wi-Fi foi capaz de identificar as flutuações na lotação do veículo, em diferentes situações operacionais de pico e entre pico. Salvo, exceções quando a ocupação aumenta vários níveis num período muito curto de tempo e quando o ônibus sai do terminal de passageiros.

Não há como comparar diretamente os resultados apresentados com a precisão dos experimentos similares na literatura, pois, estes utilizam uma contagem discreta de passageiros, enquanto aqui, utilizou-se uma escala relativa da ocupação. Todavia, viu-se que, da mesma forma como relatado por outros autores, o sensor foi eficiente em reagir a diferentes carregamentos durante as viagens realizadas (HANDTE et al., 2014; DUNLAP et al., 2016).

Através da análise geográfica elaborada por meio de mapas, viu-se os trechos e regiões onde os ônibus transportaram um número maior de pessoas. Os mapas de trajetória foram úteis para visualizar a lotação do veículo durante o percurso da linha, da mesma forma como os sistemas de informação sobre o tráfego. Os mapas de densidade proporcionaram uma visão dos trechos onde houve uma maior movimentação de pessoas, permitindo uma visão de origem e destino mais populares dentro das viagens realizadas.

Outra possibilidade, a partir da análise geográfica produzida nesta pesquisa, é o seu contraste e validação em face a outros métodos de cálculo da matriz de OD. Em especial quando comparado a outras técnicas de estimativa da matriz OD e da distribuição espacial da lotação, como o método de cálculo a partir da informação de bilhetagem (ARBEX; CUNHA, 2017), que não foi executada nesta pesquisa pela dificuldade de se obter dados compatíveis com a amostra utilizada.

Não obstante, percebe-se que através dos resultados apresentados neste capítulo, cria-se um leque de possibilidades e análises derivados do cálculo da ocupação. Da mesma forma, espera-se com a popularização de *smartphones* (FUNDAÇÃO GETULIO VARGAS, 2018) e aperfeiçoamento do método, explorado por esta pesquisa, se possa alcançar resultados mais confiáveis e fidedignos, tanto para os passageiros quanto para os operadores, visando mitigar os efeitos adversos do sobrecarregamento e criando um TP mais sustentável.

5 CONCLUSÃO

Por meio da revisão literária deste trabalho foi possível explorar o efeito da ocupação do TP por ônibus, tanto para a operação quanto para os passageiros. Viu-se que quanto mais lotado o veículo fica, mais aumenta a variabilidade e diminui sua confiabilidade (HENDREN et al., 2015), que é um dos principais fatores de qualidade para os usuários do TP (REDMAN et al., 2013).

Por outro lado, das tecnologias disponíveis de APC não há nenhuma que é amplamente adotada devido ao seu custo de aquisição, implantação e manutenção (BARABINO; DI FRANCESCO; MOZZONI, 2014). Assim, o sensoriamento de telefones móveis surge como uma alternativa viável por possuir um custo menor de aquisição e implantação (CALABRESE et al., 2011).

Das alternativas estudadas, concluiu-se que o sinal Wi-Fi é o mais adequado para situações em que a área de interesse não é extensa e a velocidade de viagem do indivíduo é baixa (LESANI; ROMANCYSHYN; MIRANDA-MORENO, 2016), tornando-a aderente as condições encontradas dentro de um ônibus. Da mesma forma, observou-se que o procedimento de sensoriamento pelo protocolo Wi-Fi se dá por escutar e armazenar o sinal de requisição (PR) que os dispositivos móveis emitem no ambiente, enquanto estes estiverem estão sendo utilizados.

À vista disso foi possível construir um protótipo de APC, utilizando apenas componentes disponíveis no mercado de varejo, com um custo baixo, com um microcontrolador, uma antena Wi-Fi e um módulo de GPS embutido, como foi descrito no capítulo 3. A única consideração a ser feita é que o componente de GPS utilizado apresentou uma confiabilidade baixa levando o pesquisador a sugerir substituí-lo a por outro modelo em pesquisas futuras.

O dispositivo foi instalado na linha 6500-10 entre o Terminal Santo Amaro e o Terminal Bandeira, na cidade de São Paulo, uma vez que, segundo o IBGE (2016) mais de 80% das pessoas, entre 15 e 60 anos, possuem telefones celulares. Durante o experimento foram coletadas 7 amostras no trajeto de ida e volta, em diferentes horários de pico e entre pico, que acumularam quase 820 mil de avistamentos de PR e 55 mil pontos de GPS.

Igualmente, foi proposto um algoritmo de janela deslizante para estimar a ocupação do veículo. O procedimento consiste em analisar os dados coletados pelo sensor Wi-Fi nos últimos 5 minutos, com atualização da janela a cada 1 minuto, utilizando a heurística que um passageiro deve ser avistado mais vezes que transeuntes nas redondezas do ônibus. Os parâmetros foram calibrados especificamente para a linha escolhida, que se desloca de um ponto para o outro levando em média 3 min 14 min, com tempo mínimo próximo a 1 min e máximo de 9 min 32 segs.

O algoritmo foi ajustado para considerar como passageiros aqueles cujos sinais PR aparecem no mínimo 15 vezes dentro da janela especificada, tendo um erro total de $\theta = 1,1180$ no nível de ocupação comparado com a pesquisa visual, o que se traduz em aproximadamente a 22 passageiros. Esse valor é próximo ao erro relatado ao método de APC instalados na suspensão de veículo, que tem características muito semelhantes ao método aplicado, como o fato de não necessitar manter na memória o estado da lotação anterior para calcular a mais atual (NIELSEN et al., 2014).

Durante o experimento o algoritmo foi capaz de, em 85% dos casos (11 do total de 13), de capturar as mudanças da lotação durante o trajeto do ônibus, com um erro máximo de 20% e, em alguns casos, próximo a 5%.

Entretanto, o algoritmo não foi tão eficiente quando houve uma mudança repentina da ocupação, que pode ter sido causado pela latência do método em relação à pesquisa visual. Outra hipótese para esse circunstância é que quando há muitos passageiros embarcando num ônibus, aumentando em vários níveis sua lotação, eles não utilizam tanto o telefone celular, diminuindo o número de avistamentos coletados, assim como indicam Calabrese et al. (2011).

Da mesma maneira, ao longo do procedimento observou-se um erro maior durante o início da viagem, quando o ônibus ainda estava no terminal. Local que abriga passageiros de diversas linhas e que estimularam o sensor enquanto o veículo estava parado, situação que não foi contemplada na heurística adotada. Assim propõe-se ignorar os dados obtidos antes da viagem se iniciar, pesquisando maneiras alternativas de calcular a ocupação em tal cenário.

Já em relação à geração de matrizes de origem e destino, viu-se que, através dos dados da ocupação associados com a latitude e longitude do veículo, estes

permitem a análise das regiões onde houve maior demanda, dado que pode ser utilizado para a validação das pesquisas tradicionais de OD (WILLMOTT; MATSUURA, 2005). Também se observou que há uma relação inversa entre a lotação e a velocidade, isto é, quanto mais passageiros embarcados menor será a velocidade média, assim como indicado pela literatura (TIRACHINI; HENSHER; ROSE, 2013).

Finalmente, não há evidências o suficiente para generalizar que o APC por sensoriamento Wi-Fi pode ser aplicado para toda e qualquer operação, dado ao método de amostragem quase-experimental utilizado. Todavia, através do método descrito no capítulo 3, se espera auxiliar na criação de um procedimento que pode ser repetido e levado adiante para outros cenários do TP.

5.1 PESQUISAS FUTURAS

Como sugestão para pesquisas futuras se recomenda a aplicação do mesmo experimento em diferentes condições da operacionais, tais como: linhas vicinais e/ou diferentes tipos de veículos. Investigando a acurácia do sistema de forma mais extensa e refinando o algoritmo para toda a população de veículos.

Outra proposta é o estudo do cálculo da ocupação em situações quando o veículo fica muito tempo parado em um local com um acúmulo de pessoas que não estão embarcadas no ônibus, como o encontrado em terminais e pontos finais. Buscando métodos diferentes para determinar a lotação inicial do veículo ou calibrando os parâmetros do algoritmo para essa conjectura.

Por último, também se sugere o contraste e a validação da matriz de OD obtida através do sensor Wi-Fi defronte a outros métodos de pesquisas, como a técnica de estimativa através dos dados de bilhetagem eletrônica. Complementado a análise iniciada aqui e contribuindo para um entendimento mais abrangente da solução apresentada neste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS¹²

ABEDI, N.; BHASKAR, A.; CHUNG, E.; MISKA, M. Assessment of antenna characteristic effects on pedestrian and cyclists travel-time estimation based on Bluetooth and WiFi MAC addresses. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies, Transportation Research Part C: Emerging Technologies** v. 60, p. 124-131. nov. 2015.

AGUILÉRA, V.; ALLIO, S.; BENEZECH, V.; COMBES, F.; MILION, C. Using cell phone data to measure quality of service and passenger flows of Paris transit system. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, v. 43, n. 2, p. 198-211. 2014.

ARBEX, R.; CUNHA, C. Estimaco da matriz origem-destino e da distribuico espacial da lotaco em um sistema de transporte sobre trilhos a partir de dados de bilhetagem eletrnica. **Transportes** v. 25, n. 3, p. 166-177. 2017.

BALTES, M.; REY, J. The "Ins and Outs" of APCs: An Overview of Automatic Passenger Counters. **Journal of Public Transportation** , v. 2, n. 2, p. 47-65. 1999.

BARABINO, B.; DI FRANCESCO, M.; MOZZONI, S. An Offline Framework for Handling Automatic Passenger Counting Raw Dat. **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**, v. 15, n. 6. Dezembro 2014.

BHASKAR, A.; CHUNG, E. Fundamental understanding on the use of Bluetooth scanner as a complementary transport data. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, v. 37, p. 42-72. 2013 2013.

BHATT, D.; BABU, S.; CHUDGAR, H. A novel approach towards utilizing Dempster Shafer fusion theory to enhance WiFi positioning system accuracy. **Pervasive and Mobile Computing**, v. 37, p. 115-123. jun. 2017.

BOLFARINE, H.; BUSSAB, W. **Elementos de amostragem**. 1ª edico ed. So Paulo: Editora Blucher, 2007. 274 p.

BOUMAN, P.; KROON, L.; VERVEST, P.; MARÓTI, G. Capacity, information and minority games in public transport. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, v. 70, p. 157-170. set. 2016.

CALABRESE, F.; COLONNA, M.; LOVISOLO, P.; PARATA, D.; RATTI, C. Real-Time Urban Monitoring Using Cell Phones: A Case Study in Rome. **IEEE Transactions On Intelligent Transportation Systems**, v. 12, n. 1, p. 141-151. out. 2011.

CAMPBELL, D.; STANLEY, J. **Experimental and quasi-experimental designs for research**. 1ª edico ed. Chicago: Rand McNally. 1963.

¹² De acordo com a Associao Brasileira de Normas Tcnicas (ABNT NBR 6023).

CANTWELL, M.; CAULFIELD, B.; O'MAHONY, M. Examining the Factors that Impact Public Transport Commuting Satisfaction. **Journal of Public Transportation** v. 12, n. 2, p. 1-21. 1 out. 2009.

CARAGLIU, A.; DEL BO, C.; NIJKAMP, P. Smart cities in Europe. **Serie research memoranda**, v. 48, p. 1-15. 2009.

CUI, A. **Bus Passenger Origin-Destination Matrix Estimation Using Automated Data Collection Systems**. Massachusetts: Dissertação (Mestrado) - Massachusetts Institute of Technology. 2006.

DAN, B. K.; KIM, Y.-S.; SURYANTO; JUNG, J.-Y.; KO, S.-J. Robust people counting system based on sensor fusion. **IEEE Transactions on Consumer Electronics**, v. 58, n. 3, p. 1013-1021. ago. 2012.

DARIDO, G.; PENA, I. Planejamento em Sistemas de Transportes Inteligentes (ITS): Perspectivas das Experiências Internacionais. **Série Cadernos Técnicos: Sistemas Inteligentes de Transportes**, v. 8, p. 10-48. mai. 2012.

DEIBEL, L.; WOOD, P. On-Board Data Collection for Transit Operations. **IEEE Transaction on Vehicular Technology**, v. 26, n. 1, p. 38-42. 1977.

DELL'OLIO, L.; IBEAS, A.; RUISÁNCHEZ, F. Optimizing bus-size and headway in transit networks. **Transportation**, v. 39, n. 2, p. 449-464. mar. 2012.

DINIZ, M.; ARCOVERDE, L. Corredores de ônibus em São Paulo registram pior velocidade média dos últimos 4 anos em 2017. **Globo.com: G1 São Paulo**. 01 jan. 2018. Disponível em: <<https://g1.globo.com/sp/sao-paulo/noticia/corredores-de-onibus-em-sp-registram-pior-velocidade-media-dos-ultimos-4-anos-em-2017.ghtml>>. Acesso em 14 out. 2018.

DUNLAP, M.; LI, Z.; HENRICKSON, K.; WANG, Y. Estimation of Origin and Destination Information from Bluetooth and Wi-Fi Sensing for Transit. **Journal of the Transportation Research Board, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board** v. 2595, p. 11-17. 2016.

FEYNMAN, R. P. Cargo Cult Science. **Caltech Magazine**. jun. 1974. Disponível em: <<http://calteches.library.caltech.edu/3043/1/CargoCult.pdf>>. Acesso em 11 out. 2018.

FITZSIMMONS, J. A.; FITZSIMMONS, M. J. **Administração de serviços: operações, estratégia e tecnologia de informação**. São Paulo: Bookman, 2010. 583 p.

FUNDAÇÃO GETULIO VARGAS. 29ª Pesquisa Anual do Uso de TI, **Centro de Tecnologia de Informação Aplicada da FGV-EAESP**. São Paulo: 2018.

FURTH, P.; STRATHMAN, J.; HEMILY, B. Marketing and Fare Policy: Making Automatic Passenger Counts Mainstream: Accuracy, Balancing Algorithms, and Data Structures. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, v. 1927, p. 205-216. jan. 2005.

GANTI, R.; YE, F.; LEI, H. Mobile crowdsensing: current state and future challenges. **IEEE Communications Magazine**, v. 49, n. 11, p. 32-39. nov. 2011.

GAUTHIER, M. Wireless Networking in the Developing World. **WNDW**. 2013. Disponível em: <http://wndw.net/download/WNDW_Standard.pdf>. Acesso em 2018 out. 3.

GOOGLE. Which devices do people use?. **Consumer Barometer**. 2017. Disponível em: <<https://www.consumerbarometer.com/en/graph-builder/?question=M1&filter=country:brazil>>. Acesso em 1 out. 2018.

HAJMOHAMMAD, S.; ELBIAZE, H. Unlicensed spectrum splitting between Femtocell and WiFi. In: IEEE International Conference on Communications (ICC), 2013. **Anais...** Budapest: IEEE. 2013.

HANDTE, M.; IQBAL, M.; WAGNER, S.; APOLINARSKI, W.; MARRÓN, P.; NAVARRO, M.; MARTINEZ, S.; BARTHELEMY, S.; FERNÁNDEZ, M. Crowd Density Estimation for Public Transport Vehicles. In: Workshop Proceedings of the EDBT/ICDT 2014 Joint Conference, 2014. **Anais...** Atenas: EDBT/ICDT, p. 315-322. 2014.

HARA, T.; SIGG, S.; SHU, L.; PELLEGRINI, F.; PETRIOLI, C.; MADRIA, S. K. Emergent Topics for Mobile and Ubiquitous Systems in Smartphone, IoT, and Cloud Computing era. **IEEE Access Special Section Editorial** v. 5, p. 27827-27830. 2017.

HAYWOOD, L.; KONING, M. The distribution of crowding costs in public transport: New evidence from Paris. **Transportation Research Part A**, v. 77, p. 182-201. jul. 2015.

HENDREN, P.; ANTOS, J.; CARNEY, Y.; HARCUM, R. Transit Travel Time Reliability: Shifting the Focus from Vehicles to Customers. **Journal of the Transportation Research Board**, v. 2535, p. 35-44. 2015.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. 802.11-2016 - IEEE Standard for Information technology, Telecommunications and information exchange between systems Local and metropolitan area networks, Specific requirements - Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY). **IEEE Standards**. 14 dec. 2016. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/servlet/opac?punumber=7786993>>. Acesso em 3 out. 2018.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. Guidelines for Use of Extended Unique Identifier (EUI), Organizationally Unique Identifier (OUI), and Company ID (CID). **IEEE Standards**. 03 ago. 2017. Disponível em: <<https://standards.ieee.org/content/dam/ieee-standards/standards/web/documents/tutorials/eui.pdf>>. Acesso em 4 out. 2018.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. IEEE Standards Association (Registration Authority): Company ID. **IEEE Standards**. 2018. Disponível em: <<http://standards-oui.ieee.org/cid/cid.txt>>. Acesso em 4 out. 2018.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios: Síntese de indicadores 2015, **IBGE**. Rio de Janeiro: 2016.

JARA-DÍAZ, S.; GSCHWENDER, A. Towards a general microeconomic model for the operation of public transport. **Transport Reviews** v. 23, n. 4, p. 453-469. nov. 2003.

JARA-DÍAZ, S. R.; GSCHWENDER, A. The Effect of Financial Constraints on the Optimal Design of Public Transport Services. **Transportation**, v. 36, n. 1, p. 65-75. fev. 2009.

JI, Y.; MISHALANI, R.; MCCORD, M.; GOEL, P. Identifying Homogeneous Periods in Bus Route Origin-Destination Passenger Flow Patterns from Automatic Passenger Counter Data. **Journal of the Transportation Research Board**, v. 2216. 2014.

JUPYTER DEVELOPMENT TEAM. Jupyter Notebook. **Project Jupyter**. 2018. Disponível em: <<http://jupyter.org/>>. Acesso em 26 out. 2018.

KELLEY, W. M.; DONNELLY, R. A. **The Humongous Book of Statistics Problems**. 1ª edição ed. New York: Alpha Books. 2009.

KHOO, H. L.; TEOH, L. E.; MENG, Q. A bi-objective optimization approach for exclusive bus lane selection and scheduling design. **Engineering Optimization**, v. 46, n. 7, p. 987-1007. 2014.

KOTZ, A. J.; KITTELSON, D. B.; NORTHROP, W. F. Novel Vehicle Mass-Based Automated Passenger Counter for Transit Applications. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, v. 2536, p. 37-43. 2015.

LABOVITZ, S. Criteria for Selecting a Significance Level: A Note on the Sacredness of .05. **The American Sociologist**, v. 3, n. 3, p. 220-222. ago. 1968.

LASKARIS, G.; CATS, O.; JENELIUS, E.; VITTI, F. A real-time holding decision rule accounting for passenger travel cost. In: IEEE 19th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), 2016. **Anais...** Rio de Janeiro: IEEE, p. 2410-2416. 2016.

LEE, K. I.; KOVAL, J. J. Determination of the best significance level in forward stepwise logistic regression. **Communications in Statistics - Simulation and Computation**, v. 26, n. 2, p. 559-575. 1997.

LESANI, A.; MIRANDA-MORENO, L. Development and Testing of a Real-Time WiFi- Bluetooth System for Pedestrian Network Monitoring and Data Extrapolation. In: 95nd Annual Meeting of the Transportation Research Board, 2016. **Anais...** Washington, D.C.: Transportation Research Board. 2016.

LESANI, A.; ROMANCYSHYN, T.; MIRANDA-MORENO, L. Arterial Traffic Monitoring Using an Integrated WiFi-Bluetooth System. In: 95nd Annual Meeting of the Transportation Research Board, 2016. **Anais...** Washington D.C.: Transportation Research Board. 2016.

LIU, S.; PU, J.; LUO, Q.; HUAMIN, Q.; NI, L.; KRISHNAN, R. VAIT: A Visual Analytics System for Metropolitan Transportation. **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**, v. 14, n. 4, p. 1586-1596. dez. 2013.

LUMENTUT, S.; GUNAWAN, F. Evaluation of Recursive Background Subtraction Algorithms for Real-Time Passenger Counting at Bus Rapid Transit System. **Procedia Computer Science**, v. 59, p. 445-453. 2015.

MA, H.; ZHAO, D.; YUAN, P. Opportunities in mobile crowd sensing. **IEEE Communications Magazine**, v. 52, n. 8, p. 29-35. 2014.

MARTE, C.; SILVA, A.; DANTAS, A.; AZEVEDO, D.; NETTO, J.; MARQUEZ, J.; GRILLO, J. C. S. Estudo Preliminar de Funções ITS Aplicadas na Operação de Sistemas BRT. **Série Cadernos Técnicos: Sistemas Inteligentes de Transportes**, v. 8, p. 10-48. mai. 2012.

MA, X.; WANG, Y. Development of A Data-driven Platform for Transit Performance Measures Using Smart Card Data and GPS Data. **Journal of Transportation Engineering**, v. 140, n. 12, p. 1-12. dez. 2014.

MENDONÇA, A. BRT do Rio vai ganhar 2 dos maiores ônibus articulados do mundo. **Globo.com: G1 Rio de Janeiro**. 18 set. 2014. Disponível em: <<http://g1.globo.com/rio-de-janeiro/noticia/2014/09/brt-do-rio-vai-ganhar-2-dos-maiores-onibus-articulados-do-mundo.html>>. Acesso em 27 set. 2018.

MONTGOMERY, D.; RUNGER, G. **Estatística Aplicada Probabilidade para Engenheiros**. 2ª edição ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009. 463 p.

MOORE, J.; GIULIANO, G.; MARCH, J. Performance of Automatic Passenger Counters in the Ventura/Lompoc Smart Card Demonstration Project. **Journal of Intelligent Transportation Systems**, v. 7, n. 2, p. 131-150. mar. 2002.

MUSA, A.; ERIKSSON, J. Tracking Unmodified Smartphones Using Wi-Fi Monitors. In: 10th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys 2012), 2012. **Anais...** Toronto, Canada: ACM SenSys. 2012.

NIELSEN, B. F.; FRØLICH, L.; NIELSEN, O. A.; FILGES, D. Estimating passenger numbers in trains using existing weighing capabilities. **Transportmetrica A: Transport Science**, v. 10, n. 6, p. 502-517. 2014.

OPENSTREETMAP CONTRIBUTORS. Planet dump retrieved from <http://download.geofabrik.de>. **Geofabrik Downloads**. 2018. Disponível em: <<http://download.geofabrik.de/south-america/brazil.html>>. Acesso em 26 out. 2018.

ORANSIRIKUL, T.; NISHIDE, R.; PIUMARTA, I.; HIDEYUKI, T. Measuring Bus Passenger Load by Monitoring Wi-Fi Transmissions from Mobile Devices. In: International Workshop on Innovations in Information and Communication Science and Technology, 2014. **Anais...** Warsaw: IICST 2014, p. 120-125. 2014.

ORANSIRIKUL, T.; NISHIDE, R.; PIUMARTA, I.; TAKADA, H. Feasibility of Analyzing Wi-Fi Activity to Estimate Transit Passenger Population. In: IEEE 30th International Conference On Advanced Information Networking And Applications, 2016. **Anais...** Switzerland: Institute of Electrical and Electronics Engineers, p. 362-369. 2016.

ORTÚZAR, J. D. D.; WILLUMSEN, L. **Modelling Transport**. Reino Unido: John Wiley & Sons, Ltd, 2011. 608 p.

PARASURAMAN, A.; ZEITHAML, V.; BERRY, L. SERVQUAL: A Multiple Item Scale for Measuring Consumer Perceptions of Service Quality. **Journal of Retailing**, v. 64, n. 1, p. 14-40. 1988.

PELLETIERA, M.-P.; TRÉPANIÉRA, M.; MORENCY, C. Smart card data use in public transit: A literature review. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, v. 19, n. 4, p. 557-568. ago. 2011.

PERNG, J.-W.; WANG, T.-Y.; HSU, Y.-W.; WU, B.-F. The design and implementation of a vision-based people counting system in buses. In: International Conference On System Science And Engineering (ICSSE), 2016. **Anais...** Taiwan: (s.n.), p. 1-3. 2016.

POUCIN, G.; FAROOQ, B.; PATTERSON, Z. Pedestrian activity pattern mining in WiFi- network connection data. In: 95nd Annual Meeting of the Transportation Research Board, 2016. **Anais...** Washington, D.C.: Transportation Research Board. 2016.

PREFEITURA DE SÃO PAULO. Padrões Técnicos de Veículos. **Prefeitura da Cidade de São Paulo: Secretaria de Transportes**. 2006. Disponível em: <<https://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/upload/transportes/SPTrans/Edital-area4-2006/anexo5/ANEXO-5-1-4-Articulado.pdf>>. Acesso em 11 out. 2018.

QGIS DEVELOPMENT TEAM. QGIS Geographic Information System. **Open Source Geospatial Foundation Project**. 2018. Disponível em: <<http://qgis.osgeo.org>>. Acesso em 26 out. 2018.

REDMAN, L.; FRIMAN, M.; GARLING, T.; HARTING, T. Quality attributes of public transport that attract car users: A research review. **Transport Policy**, v. 25, p. 119-127. jan. 2013.

SANTANA, A. **Simulação Computacional da Distribuição de Usuário em Sistemas de Transporte Coletivo via Autômatos Celulares**. Paraná: Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná. 2015.

SIEGEL, S.; CASTELLAN, J. **Estatística não-paramétrica para ciências do comportamento**. 2ª edição ed. São Paulo: Artmed, 2008. 448 p.

SPENCE, I. No Humble Pie: The Origins and Usage of a Statistical Chart. **Journal of Educational and Behavioral Statistics**, v. 30, n. 4, p. 353-368. 2005.

SPTRANS. Indicadores do Sistema de Transporte. **Prefeitura de São Paulo: Mobilidade e Transportes**. 2018. Disponível em: <https://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/transportes/institucional/sptrans/acesso_a_informacao/index.php?p=152415>. Acesso em 26 set. 2018.

STATCOUNTER. Mobile Vendor Market Share Brazil. **Statcounter: GlobalStats**. 2018. Disponível em: <<http://gs.statcounter.com/vendor-market-share/mobile/brazil/#monthly-201709-201805>>. Acesso em 14 out. 2018.

STRATHMAN, J.; KIMPEL, T.; CALLAS, S. Validation and Sampling of Automatic Rail Passenger Counters for National Transit Database and Internal Reporting at TriMet. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board** v. 1927, p. 217–222. 2005.

TIRACHINI, A.; HENSHER, D.; ROSE, J. Crowding in public transport systems: Effects on users, operation and implications for the estimation of demand. **Transportation Research Part A: Policy and Practice** v. 53, p. 36-25. jul. 2013.

VUCHIC, V. Bus Semirapid Transit Mode Development and Evaluation. **Journal Of Public Transportation**, v. 5, n. 2, p. 71-95. jun. 2002.

WANG, W.; ATTANUCCI, J.; WILSON, N. Bus Passenger Origin-Destination Estimation and Related Analyses Using Automated Data Collection Systems. **Journal of Public Transportation**, v. 14, n. 4, p. 131–150. dez. 2011.

WATANABE, T.; MIZUNO, T.; MAKINO, Y. An all-digital analog-to-digital converter with 12-/spl mu/V/LSB using moving-average filtering. **IEEE Journal of Solid-State Circuits**, v. 38, n. 1, p. 120-125. 2003.

WILLMOTT, C.; MATSUURA, K. Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance. **Climate Research**, v. 30, p. 79-82. 19 dez. 2005.

ZHAO, J.; ZHOU, X. Improving the Operational Efficiency of Buses With Dynamic Use of Exclusive Bus Lane at Isolated Intersections. **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**, v. Acesso antecipado, p. 1-12. 23 abr. 2018.

ZHOU, C.; DAI, P.; WANG, F.; ZHANG, Z. Predicting the passenger demand on bus services for mobile users. **Pervasive and Mobile Computing**, v. 25, p. 48-66. 2016.

