



**COPPE/UFRJ**

CARACTERIZAÇÃO DA MOBILIDADE VEICULAR E O SEU IMPACTO NAS  
REDES VEICULARES TOLERANTES A ATRASOS E DESCONEXÕES

Rodrigo Freitas Silva

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Sistemas e Computação, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Sistemas e Computação.

Orientador(es): Luís Felipe Magalhães de Moraes

Rio de Janeiro

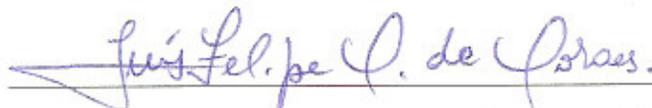
Junho de 2010

CARACTERIZAÇÃO DA MOBILIDADE VEICULAR E O SEU IMPACTO NAS  
REDES VEICULARES TOLERANTES A ATRASOS E DESCONEXÕES

Rodrigo Freitas Silva

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO  
ALBERTO LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE  
ENGENHARIA (COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE  
JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA  
A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA  
DE SISTEMAS E COMPUTAÇÃO.

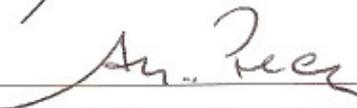
Examinada por:



Prof. Luís Felipe Magalhães de Moraes, Ph. D.



Prof. Claudio Luis de Amorim, Ph. D.



Prof. Aloysio de Castro Pinto Pedroza, Dr.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

JUNHO DE 2010

Silva, Rodrigo Freitas

Caracterização da Mobilidade Veicular e o seu Impacto nas Redes Veiculares Tolerantes a Atrasos e Desconexões/Rodrigo Freitas Silva. - Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2010.

XVII, 107 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Luís Felipe Magalhães de Moraes

Dissertação (mestrado) - UFRJ/COPPE/Programa de Engenharia de Sistemas e Computação, 2010.

Referências Bibliográficas: p. 99-107.

1. Redes Móveis Sem Fio. 2. DTNs Veiculares. 3. Mobilidade Veicular. 4. Modelos de Mobilidade. 5. Avaliação de Desempenho. I. Moraes, Luís Felipe Magalhães de II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia de Sistemas e Computação. III. Título.

# Dedicatória

*Dedico essa dissertação de mestrado especialmente para o meu filho, Lucas Montes Silva, por toda alegria e felicidade que tem me proporcionado durante a elaboração deste trabalho.*

# Agradecimentos

Agradeço aos meus pais, José Américo e Maria de Lourdes, por todo apoio oferecido não só durante a realização deste trabalho, como durante a vida inteira; também agradeço a minha irmã Renata, por toda ajuda prestada e conselhos oferecidos.

Agradeço também a mãe do meu filho Débora, que atualmente e juntamente com o meu filho Lucas tem me trazido muita alegria e força para chegar tão longe.

Agradeço a todos os amigos do Laboratório Ravel pela amizade, companheirismo e conselhos, especialmente para aqueles que contribuíram para a elaboração dessa dissertação.

Não poderia deixar de agradecer também a todas aquelas pessoas que eu conheci e são meus amigos no Rio de Janeiro, especialmente aqueles que moravam comigo na república e contribuíram com o meu trabalho.

Ao meu orientador, Prof. Luís Felipe, pelos conselhos, pela oportunidade de trabalho e pela infraestrutura oferecida. Agradeço também aos membros da banca Cláudio Luis de Amorim e Aloysio Pedroza pela valiosa contribuição expressa através das críticas, comentários e sugestões.

À FAPERJ e à CNPQ pelo financiamento da pesquisa e ao Programa de Engenharia de Sistemas e Computação (PESC/COPPE/UFRJ), pelo apoio operacional.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

## CARACTERIZAÇÃO DA MOBILIDADE VEICULAR E O SEU IMPACTO NAS REDES VEICULARES TOLERANTES A ATRASOS E DESCONEXÕES

Rodrigo Freitas Silva

Junho/2010

Orientador: Luís Felipe Magalhães de Moraes

Programa: Engenharia de Sistemas e Computação

Neste trabalho é apresentada uma análise dos registros da mobilidade veicular, capturada através de um dispositivo GPS na cidade de Muriaé (Minas Gerais), que tem como objetivo investigar as características da movimentação de ônibus públicos urbanos. Desta forma, foram obtidas informações estatísticas dos componentes: velocidade, aceleração, ângulo de mudança de direção e tempo de pausa; extraídos do movimento capturado. A partir dos dados obtidos, verificou-se que a distribuição que melhor se ajustou aos componentes velocidade e ângulo de mudança de direção foi a distribuição Weibull; e para a aceleração e tempo de pausa foram as distribuições Normal e a Lognormal, respectivamente. Posteriormente, os registros da mobilidade veicular foram utilizados na avaliação do desempenho de protocolos de roteamento das redes veiculares tolerantes a atrasos e desconexões, e verificou-se então que o MaxProp apresentou melhor desempenho nos cenários avaliados. Por fim, as informações obtidas sobre a mobilidade real foram utilizadas para configurar e adaptar alguns modelos de mobilidade veicular conhecidos. Tais modelos foram então utilizados para investigar através de simulações, o impacto da mobilidade real e da mobilidade sintética no desempenho da rede. Concluiu-se em seguida, que a mobilidade sintética não substituiria satisfatoriamente a mobilidade real quando a intenção é realizar uma avaliação precisa do desempenho dos protocolos de roteamento das redes veiculares.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

CHARACTERIZATION OF VEHICLE MOBILITY AND ITS IMPACT ON  
DELAY/DISRUPTION TOLERANT VEHICULAR NETWORKS

Rodrigo Freitas Silva

June/2010

Advisor: Luís Felipe Magalhães de Moraes

Department: Systems Engineering and Computer Science

This work presents an evaluation of vehicular mobility traces acquired from GPS device in the Muriaé city, state of Minas Gerais, in order to characterize the movement of buses in the public transport system. Statistical data were extracted from the following components: velocity, acceleration, angle of direction change and pause time. From the obtained data, we found out Weibull distributions which showed a good fit to both velocity and angle of direction change components. Moreover, Normal and Lognormal distributions were found to represent, respectively, acceleration and pause time components. Thereafter, we used the vehicular mobility traces to carry out a performance evaluation of routing protocols proposed for delay tolerant vehicular networks, then it was observed that the MaxProp showed better performance in the scenarios evaluated. Finally, the information obtained on the real mobility was used to configure and adapt some known vehicular mobility models. Then, these models were used to investigate through simulations, the impact of the real mobility and the synthetic mobility of the network performance. It was concluded that the synthetic mobility not satisfactorily replace the real mobility when the intention is to make an accurate analyze of the performance of routing protocols for vehicular networks.

# Conteúdo

<b>Resumo</b>	<b>vi</b>
<b>Abstract</b>	<b>vii</b>
<b>Lista de Figuras</b>	<b>xii</b>
<b>Lista de Tabelas</b>	<b>xv</b>
<b>Lista de Acrônimos</b>	<b>xvi</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Redes Móveis Sem Fio . . . . .	2
1.1.1 As Redes Veiculares . . . . .	3
1.1.2 Redes Veiculares Tolerantes a Atrasos e Desconexões . . . . .	6
1.2 Motivação e Definição do Problema . . . . .	7
1.3 Objetivos . . . . .	8
1.4 Contribuições . . . . .	9
1.5 Organização do Texto . . . . .	10
<b>2 Trabalhos Relacionados</b>	<b>12</b>

2.1	Modelos de Mobilidade Veicular . . . . .	13
2.2	Mobilidade Utilizada em Avaliações de Redes Veiculares . . . . .	16
2.3	Caracterização da Mobilidade . . . . .	18
2.4	Considerações Finais . . . . .	19
<b>3</b>	<b>Caracterização da Mobilidade Veicular</b>	<b>21</b>
3.1	Visão Geral . . . . .	22
3.2	Definição dos Componentes do Movimento . . . . .	23
3.3	Metodologia Utilizada para a Caracterização da Mobilidade . . . . .	32
3.3.1	Definição dos Cenários de Observação . . . . .	32
3.3.2	Captura e Processamento dos Dados . . . . .	33
3.3.3	Análise Estatística dos Dados . . . . .	34
3.3.4	Identificação de Padrões de Comportamento . . . . .	34
3.3.5	Visualização dos Resultados Encontrados . . . . .	35
3.4	Descrição dos Experimentos . . . . .	35
3.4.1	Ambiente de Coleta da Mobilidade . . . . .	36
3.5	Resultados Empíricos . . . . .	39
3.5.1	Velocidade . . . . .	40
3.5.2	Aceleração . . . . .	41
3.5.3	Ângulo de Mudança de Direção . . . . .	43
3.5.4	Tempo de Pausa . . . . .	43
3.5.5	Autocorrelação . . . . .	45
3.6	Análise do Comportamento da Mobilidade em Relação ao Intervalo de Tempo de Captura das Posições . . . . .	46

3.6.1	Velocidade . . . . .	48
3.6.2	Aceleração . . . . .	49
3.6.3	Ângulo de Mudança de Direção . . . . .	50
3.6.4	Tempo de Pausa . . . . .	51
3.7	Considerações Finais . . . . .	53
<b>4</b>	<b>Ajuste de Algumas Funções de Distribuição de Probabilidade em Relação aos Componentes do Movimento Capturado</b>	<b>55</b>
4.1	Visão Geral . . . . .	56
4.2	Velocidade . . . . .	58
4.3	Aceleração . . . . .	59
4.4	Ângulo de Mudança de Direção . . . . .	59
4.5	Tempo de Pausa . . . . .	60
<b>5</b>	<b>Impacto da Mobilidade Veicular Capturada no Desempenho dos Protocolos de Roteamento das Redes Veiculares Tolerantes a Atrasos e Desconexões</b>	<b>63</b>
5.1	Visão Geral . . . . .	64
5.2	Protocolos de Roteamento Avaliados . . . . .	65
5.2.1	Epidêmico . . . . .	65
5.2.2	PROPHET . . . . .	66
5.2.3	Spray and Wait . . . . .	67
5.2.4	MaxProp . . . . .	68
5.3	Métricas Utilizadas . . . . .	70
5.4	Descrição dos Experimentos . . . . .	71

5.5	Resultados . . . . .	73
5.5.1	Probabilidade de Entrega . . . . .	74
5.5.2	Atraso Médio . . . . .	76
<b>6</b>	<b>Uma Avaliação das Redes Veiculares Tolerantes a Atrasos e Desconexões sob a Influência da Mobilidade Real e Sintética</b>	<b>78</b>
6.1	Visão Geral . . . . .	79
6.2	Mobilidade Sintética e o Cenário Avaliado . . . . .	80
6.2.1	Modelo Baseado em <i>Grids</i> . . . . .	80
6.2.2	Uma evolução do City Section Mobility - CSM . . . . .	82
6.2.3	Modelo Baseado nas Linhas dos Ônibus . . . . .	83
6.3	A Influência da Mobilidade no Encontro dos Nós . . . . .	85
6.3.1	Tempo de Contato . . . . .	85
6.3.2	Tempo Entre Contatos . . . . .	88
6.4	Avaliação do Desempenho dos Protocolos de Roteamento nas DTNs Veiculares sob a Influência da Mobilidade Real e Sintética . . . . .	91
<b>7</b>	<b>Conclusões e Trabalhos Futuros</b>	<b>94</b>
7.1	Considerações Finais . . . . .	95
7.2	Trabalhos Futuros . . . . .	97
	<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>99</b>

# Lista de Figuras

3.1	Exemplo geométrico de uma mudança de direção. . . . .	27
3.2	Comportamento da mobilidade veicular no cenário investigado. . . . .	37
3.3	GPS utilizado no experimento. . . . .	39
3.4	Função de distribuição de probabilidade empírica da velocidade. . . . .	41
3.5	Função de distribuição de probabilidade empírica da aceleração. . . . .	42
3.6	Função de distribuição de probabilidade empírica do ângulo de mudança de direção. . . . .	44
3.7	Função de distribuição de probabilidade empírica do tempo de pausa. . . . .	45
3.8	Autocorrelação de cada componente do movimento veicular. . . . .	46
3.9	Funções de distribuição cumulativa empírica da velocidade sob diferentes intervalos de tempo de captura das posições. . . . .	49
3.10	Funções de distribuição cumulativa empírica da aceleração sob diferentes intervalos de tempo de captura das posições. . . . .	50
3.11	Funções de distribuição cumulativa empírica do ângulo de mudança de direção sob diferentes intervalos de tempo de captura das posições. . . . .	51
3.12	Funções de distribuição cumulativa empírica do tempo de pausa sob diferentes intervalos de tempo de captura das posições. . . . .	52

4.1	Função de distribuição cumulativa empírica da velocidade e uma comparação com as funções de distribuição cumulativa Exponencial, Gamma, Lognormal, Normal e Weibull. . . . .	59
4.2	Função de distribuição cumulativa empírica da aceleração e uma comparação com as funções de distribuição cumulativa Normal. . . . .	60
4.3	Função de distribuição cumulativa empírica do ângulo de mudança de direção e uma comparação com as funções de distribuição cumulativa Exponencial, Gamma, Lognormal, Normal e Weibull. . . . .	61
4.4	Função de distribuição cumulativa empírica do tempo de pausa e uma comparação com as funções de distribuição cumulativa Exponencial, Gamma, Lognormal, Normal e Weibull. . . . .	61
5.1	Cálculo do custo dos caminhos no MaxProp . . . . .	70
5.2	<i>Snapshot</i> da tela de interface do simulador ONE baseado na mobilidade veicular capturada . . . . .	72
5.3	Probabilidade de entrega dos protocolos de roteamento variando o raio de transmissão dos nós. . . . .	75
5.4	Probabilidade de entrega dos protocolos de roteamento variando o tamanho do <i>buffer</i> dos nós. . . . .	75
5.5	Atraso médio dos protocolos de roteamento variando o raio de transmissão dos nós. . . . .	76
5.6	Atraso médio dos protocolos de roteamento variando o tamanho do <i>buffer</i> dos nós. . . . .	77
6.1	Movimentação de 25 nós através do MBG no simulador ONE. . . . .	81
6.2	Função de distribuição cumulativa empírica dos TCs da mobilidade real e sintética. . . . .	86

6.3	Média dos tempos de contato da mobilidade real e sintética ao variar o raio dos nós. . . . .	88
6.4	Função de distribuição cumulativa empírica dos TECs das mobilidades sintéticas e da mobilidade real. . . . .	89
6.5	Média dos tempos entre contatos da mobilidade real e sintética ao variar o raio dos nós. . . . .	90
6.6	Taxa de entrega e atraso médio através do protocolo Epidêmico variando a mobilidade. . . . .	91
6.7	Taxa de entrega e atraso médio através do protocolo MaxProp variando a mobilidade. . . . .	92
6.8	Taxa de entrega e atraso médio através do protocolo Prophet variando a mobilidade. . . . .	92
6.9	Taxa de entrega e atraso médio através do protocolo <i>Spray and Wait</i> variando a mobilidade. . . . .	93

# Lista de Tabelas

3.1	Horário e local de partida de todas as 15 linhas de ônibus. . . . .	38
3.2	Medidas de interesse de cada componente do movimento veicular. . .	40
3.3	Comparação da mobilidade quando capturada em diferentes intervalos de tempo. . . . .	47
4.1	MSE e K-S entre os componentes da mobilidade veicular e algumas funções de distribuição de probabilidade. . . . .	58
5.1	Parâmetros utilizados na simulação da rede veicular avaliada . . . . .	73

# Lista de Acrônimos

V2I	: <i>Vehicle-to-Infrastructure;</i>
V2V	: <i>Vehicle-to-Vehicle;</i>
AP	: <i>Ponto de Acesso;</i>
DTN	: <i>Delay/Disruption Tolerantes Network;</i>
MANET	: <i>Mobile Ad hoc Network;</i>
VANET	: <i>Vehicular Ad Hoc Network;</i>
MOVE	: <i>MObility model generator for VEhicular networks;</i>
SUMO	: <i>Simulation of Urban MObility;</i>
CSM	: <i>City Section Mobility;</i>
SI	: Sistema Internacional de Unidades;
EPDF	: Função de Distribuição de Probabilidade Empírica;
ECDF	: Função de Distribuição Cumulativa Empírica;
GPS	: Sistema de Posicionamento Global;
IBGE	: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística;
RAVEL	: Redes de Alta Velocidade;
UFRJ	: Universidade Federal do Rio de Janeiro;
MLE	: Estimador da Máxima Verossimilhança;
MSE	: Erro Quadrático Médio;
K-S	: <i>Kolmogorov-Smirnov;</i>
RW	: <i>Random Walk;</i>
RWP	: <i>Random WayPoint;</i>

FIFO	:	<i>First-In-First-Out;</i>
PROPHET	:	<i>Probabilistic ROuting Protocol using History of Encounters and Transitivity;</i>
SW	:	<i>Spray and Wait;</i>
EUA	:	Estados Unidos da América;
ONE	:	<i>Opportunistic Network Environment;</i>
STRAW	:	<i>Street Random WayPoint;</i>
MBG	:	Modelo Baseado em Grids;
MBL	:	Modelo Baseado nas Linhas dos ônibus;
TC	:	Tempo de Contato;
TEC	:	Tempo Entre Contatos;

# Capítulo 1

## Introdução

**A**RÁPIDA evolução dos dispositivos de comunicação sem fio está proporcionando um crescimento acelerado das redes cuja a principal característica é a possibilidade de comunicação entre os nós sem a necessidade de uma infra-estrutura. Em meio a isso, observa-se que as redes móveis sem fio se destacam por permitirem a livre movimentação dos nós e por serem mais acessíveis e de rápida instalação. As redes veiculares são um subconjunto das redes móveis sem fio e estão cada vez mais ganhando espaço, já que inúmeros sistemas vêm surgindo com a finalidade de tornar o trânsito mais seguro, além de oferecerem comunicação aos motoristas e passageiros. No entanto, trabalhar com redes veiculares acarreta vários desafios, atribuídos principalmente às frequentes mudanças de sua topologia física e às dificuldades encontradas no estabelecimento de conectividade entre os dispositivos da rede. Diante disso, esta dissertação de mestrado se dedica a tratar de alguns dos problemas enfrentados pelas redes veiculares.

## 1.1 Redes Móveis Sem Fio

As tecnologias de redes sem fio estão se tornando populares nos últimos anos e a utilização já disseminada da telefonia celular é uma constatação deste fato. A promessa de acesso irrestrito à Internet, a qualquer hora e em qualquer lugar, juntamente com a proliferação das tecnologias para comunicação sem fio, evidenciadas pela grande variedade de dispositivos móveis disponíveis no mercado, são alguns dos fatores atribuídos ao fato de estarmos presenciando um rápido crescimento no número de redes móveis sem fio existentes. Essas redes possibilitam a mobilidade dos dispositivos e, além disso, possuem um baixo custo de instalação e de manutenção, podendo também ser instaladas em locais de difícil acesso.

Uma rede móvel sem fio é qualquer forma de rede cujos dispositivos (nós da rede) possuem algum tipo de mobilidade, podendo existir, entretanto, alguns nós fixos. Uma rede sem fio pode ser implantada a custos baixos se comparada às redes cabeadas e, além da economia financeira, elas podem levar o acesso à informação para as comunidades locais, distantes geograficamente dos centros urbanos e afastadas da tecnologia. O acesso à informação pode melhorar significativamente a qualidade de vida daquelas pessoas, já que mais trabalho poderá ser feito em menos tempo e com menos esforço.

Uma das formas de classificação de uma rede móvel sem fio é quanto às características da mobilidade de seus nós, podendo ser infra-estruturadas ou em modo *ad hoc*. Em modo infra-estrutura, toda a comunicação entre os dispositivos móveis da rede ocorre através de nós fixos responsáveis pela operabilidade da rede. Assim, os dispositivos móveis mesmo estando próximos, não se comunicam diretamente. Já uma rede móvel *ad hoc* (*Mobile Ad hoc Network* - MANET) [1, 2] é composta por dispositivos móveis capazes de se comunicarem entre si, não necessitando da disponibilidade de uma infra-estrutura de comunicação pré existente, sendo que quando dois dispositivos distantes um do outro querem se comunicar, outros nós intermediários podem ser utilizados para rotear os pacotes até o destino. Desta forma, os protocolos de roteamento encaminham os pacotes pela rede a fim de estabelecerem uma melhor rota de comunicação possível entre as entidades comunicantes. En-

tretanto, esse encaminhamento enfrenta alguns problemas, já que a localização dos dispositivos não são definidas por causa da mobilidade.

As redes *ad hoc* veiculares (*Vehicular Ad Hoc Networks* - VANETs) [3, 4] são um dos tipos de MANETs em que os nós móveis alcançam altas velocidades, como é o caso dos veículos. No entanto, em uma VANET utiliza-se comumente dispositivos de comunicação mais poderosos e estes possuem energia praticamente ilimitada. Os nós dessa rede podem ser submetidos a momentos de total desconexão e a longos atrasos no recebimento dos pacotes, geralmente ocasionados pelas altas velocidades dos veículos e pelo cenário em que estão inseridos. Assim, o conceito de redes tolerantes a atrasos e desconexões (*Delay/Disruption Tolerant Networks* - DTNs) surge como uma solução para possibilitar a comunicação entre os nós em cenários nos quais a conectividade entre os dispositivos é intermitente ou nos quais existem grandes atrasos para o recebimento dos pacotes. Em seguida, serão apresentados alguns conceitos sobre as redes veiculares em geral, posteriormente cumpre-se uma breve descrição sobre as DTNs veiculares.

### 1.1.1 As Redes Veiculares

Em muitos estudos, as redes veiculares em geral são definidas como uma VANET; apesar disso, neste trabalho consideramos uma VANET simplesmente como um dos tipos de redes veiculares existentes, podendo assim haver outros tipos de redes veiculares como a DTN veicular, descrita na Seção 1.1.2.

As redes veiculares constituem um tipo específico de redes móveis cuja principal característica é a capacidade dos veículos comunicarem entre si. Essas redes vêm evoluindo tecnologicamente e adotando sistemas de comunicação que possibilitam a interação entre os diferentes veículos que as compõem. O objetivo principal é garantir, de forma satisfatória, a comunicação entre os diversos usuários móveis inseridos na rede, oferecendo as condições necessárias para que aplicações, com diferentes requisitos, sejam atendidas. Essa comunicação é feita com o auxílio dos veículos capazes de enviar, receber, armazenar e encaminhar os pacotes pela rede.

Muitas aplicações para redes veiculares vêm sendo desenvolvidas. Dentre elas, existem as aplicações específicas para o trânsito, voltadas para um sistema de transporte inteligente e seguro, como a monitoração cooperativa do tráfego, o aviso das condições da rodovia, o auxílio a cruzamentos sem sinalização e a prevenção de colisões. Além dessas aplicações, imagina-se que futuramente os veículos terão acesso à internet em qualquer lugar e a qualquer instante [5, 6, 7]. Muitos pesquisadores acreditam que os benefícios oferecidos pelas redes veiculares para a segurança no trânsito e para as aplicações comerciais justificam o custo da rede, já que o valor da montagem de uma rede veicular ainda é um pouco elevado.

Uma rede veicular pode ser composta por automóveis, caminhões, ônibus etc; pode também ser formada em qualquer tipo de ambiente, sendo que cada nó da rede deve estar equipado com algum tipo de dispositivo sem fio capaz de comunicar com os dispositivos presentes nos outros veículos e, a partir daí, receber e transmitir pacotes pela rede.

As redes veiculares compartilham algumas características com as redes pessoais convencionais, como as frequentes mudanças da topologia da rede causadas pela alta mobilidade dos nós. No entanto, nas redes veiculares, a instabilidade das conexões é maior, em virtude das altas velocidades alcançadas pelos veículos, principalmente quando estão nas rodovias. A perda da conectividade durante a transmissão dos dados e o tempo reduzido em que os veículos permanecem em contato são outros problemas encontrados nas redes veiculares, já que a comunicação eventualmente pode ocorrer em ambientes onde os veículos comunicantes estão se locomovendo em direções opostas de uma rodovia de alta velocidade. Em contrapartida, o tráfego de um conjunto de veículos é influenciado por diversos fatores que podem auxiliar na projeção da rede, pois o deslocamento é feito exclusivamente em malhas viárias, tornando seu padrão de mobilidade mais previsível, o que pode ser explorado por protocolos de roteamento e aplicações sensíveis à localização [8, 9].

A comunicação entre os veículos pode ser feita de três formas diferentes, de modo *Vehicle-to-Vehicle* (V2V) puro, em modo *Vehicle-to-Infrastructure* (V2I) ou de forma híbrida [10, 11]. A arquitetura V2V é caracterizada pela descentraliza-

ção das funções na rede, em que os veículos se comunicam entre si sem qualquer infra-estrutura centralizadora auxiliando externamente. Para isso, os próprios veículos fazem o roteamento dos pacotes na rede, encaminhando-os através de outros veículos por múltiplos saltos. Apesar dessa estrutura de rede ser simples, ela possui a desvantagem de ter sua conectividade dependente da densidade e do padrão de mobilidade dos veículos.

A arquitetura infra-estruturada adota nós estáticos funcionando como pontos de acesso (AP) na rede. Esses APs centralizam todo o tráfego da rede, servindo como nós intermediários das comunicações. A vantagem do modo infra-estruturado é o aumento da conectividade e a possibilidade da comunicação com outras redes, como a Internet. Entretanto, essa conectividade da rede só é garantida mediante um grande número de APs, o que pode elevar consideravelmente o valor da sua montagem. Existe ainda uma arquitetura híbrida para redes veiculares, na qual é utilizada uma infra-estrutura mínima para aumentar a conectividade da rede e prover serviços como os de interconexão, e há também a possibilidade dos veículos se comunicarem por múltiplos saltos.

O consumo de energia normalmente é um fator crítico nas operações com redes móveis como as MANETs, pois tipicamente os nós são dispositivos sem fio, alimentados por baterias cujas capacidades de armazenamento são limitadas devido às restrições de volume e de peso dos equipamentos. No entanto, as redes veiculares possuem a vantagem de terem disponível uma fonte de energia quase ilimitada, já que as baterias dos veículos são recarregadas frequentemente, oferecendo assim às aplicações nenhuma restrição em relação ao consumo de energia.

Devido à alta mobilidade dos nós em uma rede veicular, a topologia da rede é alterada constantemente e descobrir uma rota do nó origem até o nó destino pode ser difícil. Assim, muitos protocolos de roteamento tradicionais desenvolvidos para redes móveis *ad hoc*, como o OLSR [12], AODV [13], DSR [14], poderiam não funcionar adequadamente em redes com alto nível de mobilidade cujas desconexões são mais frequentes e em que a tolerância a longos atrasos deve ser considerada. Alguns pesquisadores tentaram propor adaptações para esses protocolos, no entanto, apre-

sentaram desempenho não satisfatório em face às características particulares das redes veiculares [15, 16]. Segundo Oscar Trullols em [17], os protocolos desenvolvidos para redes *ad hoc* não funcionariam muito bem nas redes tolerantes a atrasos e desconexões, pois eles assumem a existência de um caminho fim a fim para qualquer par de nós da rede, um pequeno valor máximo para o tempo de ida e volta entre os nós, além de uma pequena probabilidade de perda dos pacotes entre nós intermediários na rede.

### 1.1.2 Redes Veiculares Tolerantes a Atrasos e Desconexões

Muitos pesquisadores definem uma Rede Veicular Tolerante a Atrasos e Desconexões (DTNs veiculares) simplesmente como uma aplicação dos protocolos de roteamento desenvolvidos para DTNs nas VANETs [17]. Outros, entretanto, consideram uma DTN veicular como a aplicação do modelo de tráfego de uma VANET em uma DTN, em que esse modelo de tráfego representa os padrões da mobilidade de uma VANET [18]. Apesar das diferentes definições atribuídas às DTNs veiculares, acreditamos que essas redes possuem características próprias, descritas a seguir.

Em geral, uma DTN veicular, assim como uma VANET, é uma rede cujos nós móveis são veículos; entretanto, essa rede está inserida em ambientes apropriados para DTNs, nos quais existem a dificuldade em manter uma comunicação fim-a-fim com pequenos atrasos e poucos pacotes perdidos. As principais características encontradas em uma DTN veicular são: grandes atrasos no recebimento dos pacotes, podendo durar horas; bem como frequentes desconexões proporcionadas pelo ambiente em que a rede é formada e pelas altas velocidades dos nós.

A maneira com que os protocolos de roteamento encaminham os pacotes na rede levam em consideração todas as diversidades na qual uma DTN veicular está envolvida. Assim, um pacote tem maiores chances de chegar até o destino com um menor atraso, aumentando, dessa forma, a qualidade da rede. Os protocolos devem aproveitar ao máximo as transmissões oportunísticas, pois não se sabe quando vão ocorrer novamente, a descrição de alguns desses protocolos e a avaliação dessa rede

será feito no Capítulo 5.

## 1.2 Motivação e Definição do Problema

As redes veiculares vêm alcançando grandes proporções e são cada vez mais utilizadas; a redução dos custos, a facilidade de implantação e a serventia dos inúmeros aplicativos disponíveis são alguns dos principais fatores responsáveis pela adoção dessas redes. No entanto, existem ainda alguns desafios a serem enfrentados pela comunidade científica, sendo que os principais problemas estão relacionados à mobilidade e à comunicação entre os nós, dado as frequentes desconectividades provocadas pelas rápidas mudanças na topologia da rede como consequência da alta mobilidade dos veículos.

Fazer avaliações de uma rede veicular e dos protocolos empregados por essa rede é muito importante para verificar a qualidade com que os usuário podem se comunicar. Essa avaliação pode ser feita através de uma análise qualitativa e quantitativa, observando certas métricas como o número de pacotes perdidos na rede e o tempo total do atraso para o pacote chegar até o seu destino. Sabe-se que a mobilidade dos veículos influencia diretamente na qualidade da rede, e, caso a mobilidade utilizada não represente adequadamente os movimentos reais dos veículos, conclusões erradas podem ser geradas a respeito da rede avaliada e dos protocolos utilizados.

A mobilidade veicular pode ser obtidas de duas formas: a partir de modelos de mobilidade veicular ou através da captura da mobilidade real. Na primeira forma, os modelos de mobilidade conhecidos na literatura são utilizados para gerar movimentos sintéticos capazes de representar de modo aproximado as movimentações veiculares reais. Entretanto, muitos modelos de mobilidade tendem a simplificar as características de um movimento real, comprometendo dessa forma o realismo da mobilidade gerada e, conseqüentemente, os resultados obtidos da rede. A outra forma de obtenção da mobilidade pode ser através de sua captura em um ambiente real do qual se deseja investigar, gerando assim resultados precisos durante avaliações dessa rede.

Devido as dificuldades em se obter registros da mobilidade real dos veículos, a maioria dos pesquisadores utilizam modelos de mobilidade quando querem avaliar uma rede veicular. Para isso, tais modelos devem ser parametrizados adequadamente a fim de produzirem movimentos mais próximos dos que os veículos fariam no cenário investigado e, essa parametrização deve ser baseada em informações extraídas do comportamento da mobilidade real dos veículos. Mediante isso, estudar as características da mobilidade veicular adquire relevância, pois tais informações podem ser utilizadas para configurar os modelos de mobilidade existentes e podem também auxiliar os pesquisadores na criação de novos modelos mais realistas.

Dentro desse contexto, essa dissertação de mestrado faz uma investigação detalhada das características da mobilidade veicular e da melhor forma de representá-la. Para isso, analisou e capturou-se registros das movimentações reais de veículos urbanos. Em seguida, foram descobertas as funções de distribuição de probabilidade conhecidas que mais se aproximaram dos componentes da mobilidade veicular real. Por fim, as informações obtidas foram utilizadas para configurar e adaptar alguns modelos de mobilidade veicular conhecidos. Os resultados foram então comparados aos da mobilidade real capturada através de avaliações no desempenho das DTNs veiculares.

### 1.3 Objetivos

Com base no exposto nas seções anteriores, o objetivo principal deste trabalho é investigar detalhadamente as características e os padrões no comportamento adotado pelos veículos em um cenário real. Além disso, pretende-se analisar, via simulação, o impacto da mobilidade real no desempenho de uma DTN veicular, onde modelos de mobilidade veicular são utilizados para comparar a mobilidade real à mobilidade sintética gerada. Mediante isso, este trabalho pretende:

- i. Caracterizar a mobilidade veicular de uma rede da qual os veículos poderiam se comunicar, investigando com precisão os componentes da mobilidade;

- ii. Extrair informações sobre o comportamento das movimentações dos veículos e identificar padrões em sua mobilidade;
- iii. Investigar o impacto do intervalo de tempo utilizado para registrar as posições dos veículos sobre o comportamento da mobilidade capturada;
- iv. Avaliar qual a distribuição de probabilidade conhecida na literatura que mais se aproxima do comportamento de cada componente da mobilidade veicular capturada;
- v. Analisar os encontros dos nós quando sob a influência da mobilidade capturada;
- vi. Analisar o desempenho dos protocolos de roteamento das DTNs veiculares utilizando a mobilidade real capturada;
- vii. Ajustar alguns modelos de mobilidade veicular existentes para que possam gerar registros de movimentações mais próximos das capturadas;
- viii. Investigar, através de simulações, o impacto da mobilidade real e da mobilidade sintética em uma DTN veicular;

## 1.4 Contribuições

Através da elaboração deste trabalho, as seguintes contribuições foram alcançadas:

- i. Caracterização da Mobilidade Veicular e o seu Impacto nas Redes Veiculares Tolerantes a Atrasos e Desconexões [19];
- ii. Obtenção de registros da mobilidade veicular de ônibus do transporte público urbano, os quais poderão ser utilizados pela comunidade científica;
- iii. Análise das características da mobilidade veicular real, extração de informações relevantes e identificação de padrões comportamentais;

- iv. Análise do comportamento da mobilidade veicular real em diferentes intervalos de captura das posições do dispositivo;
- v. Avaliação das funções de distribuição de probabilidade que mais se ajustam aos componentes do movimento capturado;
- vi. Análise do desempenho dos protocolos de roteamento das DTNs veiculares, sob diferentes modelos de mobilidade veicular, e sob os registros da mobilidade real capturada.

## 1.5 Organização do Texto

O restante deste trabalho está organizado da seguinte forma. No Capítulo 2, é feita uma revisão bibliográfica de outros estudos envolvendo a mobilidade veicular, mostrando como uma rede veicular normalmente é avaliada e expondo os modelos de mobilidade mais utilizados para representar os movimentos dos veículos nesse tipo de rede. Também serão mostrados pesquisas que utilizam a mobilidade veicular real para avaliar as redes veiculares e a fim de propor novos protocolos para esse tipo de rede. Em seguida, será mostrado o que precisa ser feito para se obter resultados e conclusões precisas durante a avaliação de uma rede veicular.

No Capítulo 3, são apresentados os componentes do movimento veicular estudados, assim como a metodologia utilizada para tornar possível a análise e a representação desses componentes investigados. Posteriormente, neste mesmo capítulo, será feita a caracterização da mobilidade veicular, baseada em registros de movimentações reais capturadas em um ambiente urbano. Em seguida, através de uma análise quantitativa e qualitativa da mobilidade veicular investigada, será mostrado o comportamento dos componentes da mobilidade, e, por fim, se realizará uma análise dos componentes do movimento quando capturados sob diferentes intervalos de tempo no qual as posições do veículo foram gravadas.

Através do Capítulo 4, será feita uma análise da aproximação dos componentes da mobilidade real capturada em relação a algumas das mais conhecidas funções de

distribuição de probabilidade ajustadas aos dados reais. Após essa análise, é possível descobrir, dentre as distribuições utilizadas, qual foi a que mais se aproximou de cada um dos componentes avaliados.

No Capítulo 5, a mobilidade veicular real será utilizada para investigar o comportamento dos protocolos de roteamento implementados nas DTNs Veiculares. Dessa forma, serão descritos alguns dos protocolos mais utilizados para rotear os pacotes em uma DTN veicular, posteriormente se observará quais deles apresentaram o melhor desempenho e uma justificativa para esse fato será discutida.

Na sequência, através do Capítulo 6, será feito um estudo da mobilidade real e da mobilidade sintética no encontro dos nós da rede. Além disso, os protocolos de roteamento das DTNs veiculares serão utilizados para avaliar a qualidade da rede sob a influência da mobilidade real e sintética.

Por fim, no Capítulo 7, são tecidas as considerações finais deste trabalho e um pequeno resumo dos resultados e contribuições obtidas serão listados. Além disso, são discutidos os desafios e as dificuldades encontradas durante o desenvolvimento desta tese. Finalmente, serão descritos uma série de trabalhos futuros que poderão ser feitos através de nossas contribuições.

## Capítulo 2

### Trabalhos Relacionados

**N**ESTE Capítulo é feita uma revisão bibliográfica de alguns estudos envolvendo a mobilidade veicular, mostrando a forma como os dispositivos das redes veiculares são representados, e os modelos de mobilidade mais utilizados para representar os movimentos dos veículos nesse tipo de rede. Além disso, são identificadas pesquisas envolvendo a mobilidade veicular real para avaliar a qualidade das redes veiculares e, sendo referência para propor novos protocolos mais eficientes para essas redes. Posteriormente, é discutida a caracterização da mobilidade, deixando constatado que nenhum trabalho encontrado analisou de forma precisa e detalhada os movimentos de veículos em ambientes reais.

## 2.1 Modelos de Mobilidade Veicular

Diversas pesquisas com base na comunicação entre veículos tem sido exploradas pela comunidade científica, e em muitas delas é utilizado algum tipo de mobilidade pré-definida para orientar as movimentações dos veículos na rede. Como tal mobilidade pode ser gerada sinteticamente por algum modelo de mobilidade conhecido, é importante estudarmos os modelos existentes na literatura e a partir de então, conhecer suas características, suas qualidades e suas limitações. Sabe-se também que, apesar desses modelos utilizarem diversos artifícios para tornar os movimentos mais realistas, poucos deles se preocupam ou levam em consideração as obstruções presenciadas pelos veículos ao se movimentarem pelo trânsito, como os semáforos, os formatos das ruas, os engarrafamentos etc. A partir desse contexto, em seguida serão apresentados alguns modelos de mobilidade propostos na literatura, ressaltando-se suas principais características.

O modelo *City Section Mobility* (CSM), proposto inicialmente por Vanessa Ann Davies [20], utiliza uma área de simulação formada por *grids* para representar as ruas de uma cidade e todas as ruas são consideradas de duplo sentido. Consequentemente, as ruas podem ser somente na vertical ou na horizontal. Feito isso, os nós escolhem aleatoriamente um dos pontos de interseção presentes no cenário como destino e se movem até este ponto pelo menor caminho possível com uma velocidade constante. A velocidade do veículo vai depender da rua na qual ele estiver se movimentando; rua essa que pode ser classificada em dois tipos: alta velocidade e baixa velocidade. Os valores das velocidades são pré-definidos pelo usuário ao gerar os registros dos movimentos. Após alcançar o ponto de destino, os nós em seguida escolhem outro destino, o processo então é reiniciado. Nenhuma pausa durante as movimentações é implementada, as interações entre os veículos também são ignoradas, pois todos os veículos adjacentes se movimentam através da mesma velocidade. Vanessa Davies propõe como trabalho futuro melhorar o CSM através da implementação de tempos de pausas após o nó alcançar o destino, acelerações e desacelerações durante as movimentações, e também utilizar outros tipos de mapas para representar as ruas de cidades que não possuem topologia em *grids*.

Uma evolução para o modelo CSM, como descrito em [21], pode ser encontrado por meio do desenvolvimento de um modelo híbrido, contendo características do RWP [22, 23, 24] e utilizando mapas reais para a movimentação dos veículos. Neste modelo, assim como no RWP, os nós são colocados aleatoriamente no mapa, se escolhem então os seus pontos de destino, que também são aleatórios, e movem-se até este ponto pelo menor caminho possível. Quando o nó chega até o ponto de destino, ele permanece parado por um determinado período de tempo (tempo de pausa) escolhido também aleatoriamente, após esse período o processo é reiniciado. A velocidade atribuída ao nó segue o modelo CSM, a qual vai depender da rua em que ele estiver percorrendo e pode ser previamente configurada pelo usuário.

Similarmente ao modelo CSM, o modelo Manhattan [25] também utiliza um cenário baseado em *grids*, e tenta simular um ambiente urbano representando as ruas de uma cidade com um mapa que contém somente linhas horizontais e verticais. Conseqüentemente, permite-se que os nós se movam em somente duas direções: norte/sul e leste/oeste. Neste modelo, os nós (veículos) são colocados aleatoriamente no mapa e começam a se mover também aleatoriamente, com uma velocidade pré definida e atribuída a rua a qual ele está percorrendo. Quando é encontrado uma interseção, o nó pode escolher continuar na mesma direção com probabilidade de  $1/2$ , ou virar a direita ou a esquerda com probabilidade de  $1/4$  cada. Também é desenvolvido nesse modelo uma distância de segurança, da qual os veículos devem permanecer distantes uns dos outros, essa distância pode opcionalmente ser configurada no modelo antes da geração da mobilidade. Este modelo de mobilidade foi implementado pelo *framework* BonnMotion, um aplicativo desenvolvido em JAVA para gerar mobilidade dos nós em um cenário com características pré definidas pelo usuário, encontra-se disponível em [26].

Em [21], foi desenvolvido um simulador para mobilidade veicular o qual os parâmetros da mobilidade podem ser totalmente configurados pelo usuário, escolhe-se as velocidades máximas dos trechos percorridos, os mapas a serem utilizados, o número de veículos se movendo e qual percurso o nó adotará do ponto de origem até o ponto de destino. Neste modelo, os sinais de trânsito também foram implementados em uma tentativa de deixar os movimentos mais realistas. Assim, caso o sinal encon-

trado em uma interseção esteja vermelho, o nó permanece parado por um tempo aleatório e só depois desse tempo ele segue seu caminho. Este simulador também permite que se visualize em tempo real os movimentos dos nós e permite a gravação de movimentações em arquivos para serem utilizados posteriormente em simuladores de rede.

Outro simulador desenvolvido, o *MObility model generator for VEhicular networks* (MOVE) [27], baseado no *Simulation of Urban MObility* (SUMO) [28], também gera movimentos baseados em mapas reais. Este simulador é composto por dois componentes principais: um editor de mapas e um editor de movimentos. O editor de mapas permite com que o mapa seja gerado automaticamente, manualmente ou importado de mapas reais existentes. Quando se deseja criar o mapa manualmente, o editor permite que o usuário desenhe por onde os nós irão percorrer, e possibilita criar rotas específicas para cada nó simulado. O outro componente deste simulador, o editor de movimentos, permite que o usuário defina completamente os parâmetros da mobilidade. Dessa forma, os parâmetros característicos da mobilidade veicular como as acelerações e desacelerações, velocidades mínimas e máximas, e os tempos de pausa de cada veículo, podem ser limitados pelos padrões de cada trajeto percorrido e/ou configurados pelos usuários do simulador.

Em [29], são apresentados e implementados uma série de modelos de mobilidade para VANETs, cada um com algumas características distintas. No entanto, a realidade dos movimentos gerados pelos modelos é prejudicada por imposições como: taxa de aceleração e desaceleração fixas em  $3m/s^2$ , tempo de pausa também fixo, mapa das ruas em formato de *grids* e todas as ruas com duplo sentido de movimentação. Para o modelo *Stop Sign*, toda rua que contém uma interseção possui um sinal, e conseqüentemente um veículo, ao chegar na interseção, deve esperar por um tempo fixo antes de seguir em frente. No modelo *Probabilistic Traffic Sign*, quando um veículo se aproxima de uma interseção e não possui nenhum veículo a sua frente, este com probabilidade  $p$  para no sinal, e com probabilidade  $(1 - p)$  segue em frente. Caso decida parar, o veículo permanece parado um tempo aleatório escolhido entre 0 e  $w$  segundos. No modelo *Traffic Light*, os sinais de trânsito são implementados de forma coordenada, dessa forma, em uma interseção onde um grupo de veículos estão

parados no sinal vermelho, existe outro grupo nessa mesma interseção que estão se movimentando com sinal verde.

Apesar dos pesquisadores estarem buscando cada vez mais a criação de modelos de mobilidade veicular que possam representar, de forma mais precisa possível, os movimentos dos veículos no cenário requerido, percebe-se, através dos modelos de mobilidade descritos nessa seção, que muitos fatores que influenciáveis no trânsito de uma cidade não foram implementados. Talvez não seja possível de eles serem implementados, já que não podem ser previstos. De qualquer maneira, há um comprometimento no realismo dos movimentos gerados. Além disso, a mobilidade ainda pode ser prejudicada pelas limitações impostas por alguns parâmetros como: velocidade máxima e aceleração/desaceleração fixos para os veículos, de acordo com o tipo de rodovia em que transitam.

## **2.2 Mobilidade Utilizada em Avaliações de Redes Veiculares**

Avaliar a qualidade de uma rede veicular e os seus protocolos de roteamento tem sido frequentemente estudado por pesquisadores. Muitos deles propõem novos protocolos a fim de melhorar o desempenho da rede. No entanto, poucos trabalhos se preocupam com as características da mobilidade da rede avaliada, considerando em seus experimentos a mobilidade sintética gerada por modelos de mobilidade pouco realistas. A mobilidade utilizada influencia diretamente no desempenho dos protocolos de roteamento avaliados. Muitas das vezes somente o uso da mobilidade real nesses experimentos pode levar a conclusões definitivas nos experimentos realizados. Assim, em seguida, serão mostrados alguns trabalhos relacionados às avaliações feitas em redes veiculares em que, algumas imposições tiveram que ser feitas para que a mobilidade pudesse ser representada. Também serão mostrados alguns trabalhos que utilizam a mobilidade real para fazer avaliações de protocolos utilizados em redes veiculares.

Em [30], os pesquisadores avaliaram cinco protocolos de roteamento utilizados em VANETs, sendo eles: GPCR, GSR, A-STAR, SAR e GeOpps. Para isso, utilizaram o simulador SUMO [28] na geração da mobilidade dos nós, configuraram então o cenário da seguinte maneira: velocidade máxima dos nós (veículos) na rede limitada a 50 Km/h, raio de transmissão fixo de 250 metros e ambiente de movimentação formado por *grids*. Percebe-se que a mobilidade utilizada neste trabalho foi muito superficial, deixando de lado muitos fatores que afetam o trânsito como os semáforos, engarrafamentos etc. Além disso ignora-se muitas características reais da mobilidade de um veículo, como as acelerações, os tempos de pausa e as mudanças de direções, que nem sempre são de 90°.

Uma modificação do protocolo de roteamento AODV [31] é proposto em [32]. O objetivo é adaptá-lo para que possa ser usado em VANETs. Os autores, então, criaram o DAODV. As modificações implementadas baseiam-se em informações extraídas das características da mobilidade veicular para melhorar o desempenho do protocolo e, conseqüentemente, a qualidade da rede. A mobilidade utilizada foi o modelo Manhattan, descrito na seção anterior; o cenário utilizado foi de 1000X1000  $m^2$  composto por 9 *grids* de tamanhos iguais; a velocidade máxima adotada pelos nós, de 20m/s; e foi feita uma simulação de 700 segundos.

Vislumbra-se também trabalhos realizados com base em registros reais e macroscópicos de movimentações veiculares, como em [33], no qual os traces de 4000 táxis circulando pelas ruas de Shangai-China foram obtidos via GPS em intervalos intercalados de 40 segundos. Chamaram então de SUVnet a rede veicular formada pelos táxis de Shanghai. Em seguida, para que a análise da rede veicular baseada nos registros reais capturados pudesse ser feita, houve a necessidade da interpolação a cada segundo das posições não informadas. De posse da mobilidade, eles então implementaram o protocolo de roteamento Epidêmico [34], comum em uma DTN, para rotear os pacotes na SUVnet. Posteriormente, analisaram alguns problemas apresentados pelo Epidêmico, e propuseram algumas melhorias, criando, assim, o protocolo de roteamento *Epidemiclike*, o qual apresentou um melhor desempenho em relação ao Epidêmico.

Em [35], foram estudados os registros da mobilidade dos ônibus, equipados com um dispositivo de comunicação sem fio, capazes de comunicarem entre si. Chamaram essa rede de DieselNet, consistindo de 40 ônibus circulando ao redor do campus da *University of Massachusetts Amherst*. Cada ônibus foi equipado com um computador com sistema operacional Linux, um ponto de acesso 802.11b, uma segunda interface 802.11b e um dispositivo GPS. Eles então analisaram o processo de contato entre os ônibus e o seu impacto no desempenho dos protocolos de roteamento de uma DTN. Em [36], a DieselNet foi utilizada como base para propor o protocolo de roteamento MaxProp, a fim de melhorar o desempenho do roteamento dos pacotes em uma DTN. No entanto, neste trabalho utilizaram registros da mobilidade de somente 30 ônibus, cada um com 720 horas de movimentações. Em ambos os trabalhos, foi dada ênfase na análise do roteamento, dos tempos de contato e entre contatos dos ônibus; tornando ausente uma investigação mais apurada sobre as distribuições dos outros componentes do movimento.

## 2.3 Caracterização da Mobilidade

A obtenção de informações precisas sobre a mobilidade real estudada é importante para que possamos conhecer o comportamento dos dispositivos móveis avaliados. No entanto, poucos trabalhos se preocupam em analisar tais informações, e, menos ainda, em utilizá-las para representar os movimentos dos nós em uma rede.

A falta de dados precisos quanto as posições reais dos veículos durante a análise de uma rede veicular, dependendo do que se for avaliado, pode implicar de forma significativa na acurácia dos resultados. Além disso, impossibilita maiores investigações para certos componentes do movimento que só podem ser analisados quando de posse de registros reais e detalhados da mobilidade.

A caracterização da mobilidade, de modo qualitativo e quantitativo, proposta por Carlos Alberto em [37], indica os procedimentos necessários que devem ser feitos para analisar, de forma detalhada, as características e os componentes da movimentação de dispositivos móveis. Foram então observadas as características do comportamento

dos pedestres em um cenário específico, no caso, o parque da Boa Vista na cidade do Rio de Janeiro. Para obter a mobilidade dos pedestres, foi dado a eles um GPS capaz de registrar sua mobilidade ao longo de suas movimentações. Posteriormente, essa mobilidade foi utilizada para representar os movimentos dos nós e fazer uma avaliação dos protocolos de roteamento de uma DTN. Maiores informações sobre a metodologia utilizada para a caracterização da mobilidade será feito no Capítulo 3.3.

Nenhum dos trabalhos pesquisados relacionados às redes veiculares estudam de forma detalhada o movimento veicular. Isso seria importante para a obtenção de informações sobre o comportamento dos componentes do movimento, como a velocidade, a aceleração/desaceleração, o ângulo de mudança de direção e o tempo de pausa. Tais informações poderiam ser úteis para a elaboração de novos modelos de mobilidade ou mesmo na configuração dos modelos já existentes.

## 2.4 Considerações Finais

A utilização de modelos de mobilidade para representar as movimentações dos nós em uma rede é muito empregada em pesquisas envolvendo redes móveis, dada a dificuldade em se obter as movimentações reais dos dispositivos avaliados. Se a mobilidade sintética gerada for muito distante das movimentações reais dos dispositivos, ela pode definitivamente prejudicar a avaliação de alguns dos protocolos implementados na rede, e fazer com que os pesquisadores tenham uma idéia errada da qualidade da rede. Assim, para que a mobilidade sintética se pareça ao máximo com a mobilidade real a ser representada é necessário configurar adequadamente os parâmetros dos modelos de mobilidade usados. Para isso, extrair informações da mobilidade real dos dispositivos móveis é fundamental para que conheçamos o comportamento deles e possamos, a partir daí, utilizar tais informações de forma apropriada nos modelos de mobilidade.

Avaliar um modelo de mobilidade veicular é importante para que se saiba se este pode ser utilizado durante simulações com redes veiculares sem causar prejuízos para os resultados obtidos da rede. Essa avaliação pode ser feita através da análise da

distância das movimentações geradas pelos modelos em relação às movimentações reais. Assim, a fim de que possamos conhecer o impacto dessa mobilidade sintética criada nos resultados obtidos, é importante observar também a qualidade da rede quando esta é influenciada pela mobilidade real ou quando sob influência da mobilidade sintética.

Tem-se também que, apesar dos modelos de mobilidade utilizarem de muitas técnicas para tentar simular os movimentos reais de dispositivos móveis, dificilmente conseguem representá-los com precisão. Essa dificuldade está atribuída às imprevisibilidades passíveis de ocorrerem durante um movimento veicular, como os engarrafamentos, as obstruções nas ruas, a ocorrência ou não de um sinal de trânsito em uma interseção etc. Por isso, sempre que possível, é melhor utilizar a mobilidade real ao realizar simulações com redes veiculares, principalmente quando é requerido exatidão para os resultados obtidos.

## Capítulo 3

# Caracterização da Mobilidade Veicular

**M**UITOS estudos utilizam modelos de mobilidade para representar a movimentação dos veículos; essa prática tem se tornado comum, dada a dificuldade de se obter registros reais da mobilidade dos veículos em uma cidade. Nesse sentido, passa a ser indispensável o estudo de alguns dos componentes do movimento veicular, pois cada vez mais há a necessidade da utilização de modelos de mobilidade reais durante uma investigação mais precisa ao se trabalhar com redes veiculares. Dessa forma, nesse capítulo são apresentados os componentes do movimento veicular que serão estudados, assim como a metodologia utilizada para tornar possível a análise e a representação desses componentes investigados. Posteriormente, neste mesmo capítulo, será feita a caracterização da mobilidade veicular, baseada em registros de movimentações reais capturados em um ambiente urbano. Por fim, através de uma análise quantitativa e qualitativa da mobilidade veicular investigada, será mostrado o comportamento dos componentes da mobilidade, e importantes resultados serão identificados.

## 3.1 Visão Geral

Verifica-se nos últimos anos uma ascensão do interesse e das pesquisas em relação às comunicações entre veículos. Devido à necessidade de uma variedade de serviços e de aplicativos que viabilizem a comunicação entre os veículos, são considerados relevantes os estudos sobre as redes veiculares.

Para a obtenção de resultados mais apurados na realização de pesquisas relacionadas às redes veiculares, é necessário a obtenção de registros de movimentos veiculares reais para representar de forma concisa as movimentações dos veículos nessas redes. No entanto, dadas as complicações na obtenção de movimentos reais, observa-se ainda muitos estudos realizados com redes veiculares utilizando modelos de mobilidade sintéticos existentes na literatura, os quais tendem a simplificar as características de um movimento real a fim de facilitar a sua representação, a sua modelagem e a sua implementação. Tais modelos pouco refletem a realidade da mobilidade dos veículos em uma cidade. Além disso, ignoram importantes fatores que podem obstruir ou favorecer o fluxo dos nós, tais como os formatos das ruas, as interseções, os sinais de trânsito, os engarrafamentos etc. Quando modelos de mobilidade não reais são empregados para analisar e avaliar o desempenho de uma rede sem fio, têm-se como consequência a geração de resultados errôneos e inapropriados, podendo não corresponder ao desempenho real da rede.

O conhecimento sobre as características das movimentações veiculares e a identificação de padrões nos movimentos dos motoristas se tornam importante para propor modificações nos modelos de mobilidade existentes, ou, até mesmo, criar novos modelos de mobilidade que se adaptem melhor ao representar um rede veicular. Dentro desse contexto, este capítulo tem como principal objetivo analisar detalhadamente as características das movimentações de veículos urbanos em um cenário real, para que, dessa forma, os pesquisadores possam obter as informações necessárias que permitam o desenvolvimento de modelos de mobilidade veicular mais realistas.

## 3.2 Definição dos Componentes do Movimento

Para alcançar o objetivo de realizar uma caracterização mais apurada do movimento veicular, é preciso fazer uma análise espaço-temporal dos componentes do movimento capturado. Esta análise consiste em um estudo que combina a investigação espacial dos componentes do movimento e a relação de dependência entre esses componentes com um determinado intervalo de tempo. A análise temporal é feita em relação a um dado instante de tempo ( $t_j$ ), no qual pode ocorrer ou não o deslocamento espacial do veículo avaliado. O deslocamento espacial está relacionado com as posições do veículo, baseadas em um sistema de coordenadas geográficas (latitude, longitude e altitude), durante o instante de tempo ( $t_j$ ) avaliado.

As posições dos veículos, observadas durante um determinado intervalo de tempo pré-estabelecido, possibilita calcular o valor de alguns componentes do movimento necessários para a caracterização da mobilidade veicular: velocidade, aceleração, desaceleração e ângulo de mudança de direção; também permite calcular outras medidas de interesse relacionadas ao movimento no qual serão definidas ao longo deste capítulo. Essas posições podem ser obtidas através de um dispositivo de localização via satélite instalado no veículo, capaz de capturar e armazenar a cada segundo a sua posição.

O estudo dos valores encontrados para os componentes do movimento analisados e para as medidas de interesse calculadas tem como objetivo identificar as características e padrões do movimento veicular em cenários específicos. Feito isso, essas informações poderão contribuir para o desenvolvimento e o aperfeiçoamento de modelos de mobilidade veiculares mais realistas. Dessa forma, a seguir serão definidas formalmente as medidas e os componentes do movimento utilizados neste trabalho.

Seja a posição do  $i$ -ésimo veículo, representada pelo vetor  $\vec{P}_i(t_j)$ , no instante de tempo  $t_j$ , para  $j = 1, 2, 3, \dots, T - 1, T$ ; onde  $t_{j+1} = t_j + \delta$  e  $\delta = 1$  segundo. O intervalo de tempo entre as observações das posições podem aumentar ou diminuir, basta alterar o valor de  $\delta$ .

O vetor  $\vec{P}_i(t_j)$  é composto por  $x_i(t_j)$ ,  $y_i(t_j)$  e  $z_i(t_j)$  nas direções  $\vec{x}$ ,  $\vec{y}$  e  $\vec{z}$ ,

respectivamente, onde  $x_i(t_j)$ ,  $y_i(t_j)$  e  $z_i(t_j)$  são números reais e a unidade de medida normalmente é dada em metros ( $m$ ) quando o movimento for de pedestres, e em quilômetros ( $km$ ) quando o movimento for de veículos ou de aviões. Dada a posição de um veículo, sua longitude é representada por  $x_i(t_j)$ , a latitude é representada por  $y_i(t_j)$ , e, por fim, sua altitude (elevação) é representada por  $z_i(t_j)$ .

$$\vec{P}_i(t_j) = (x_i(t_j), y_i(t_j), z_i(t_j)) \quad (3.1)$$

Nas movimentações investigadas, os valores para a altitude (terceira dimensão  $z_i(t_j)$ ) não puderam ser obtidos pelo dispositivo presente nos veículos; consequentemente, passamos a utilizar somente a longitude  $x_i(t_j)$  e a latitude  $y_i(t_j)$  para representar o posicionamento  $\vec{P}_i(t_j)$  dos veículos, que a partir de agora passa a ser em duas dimensões como visto na Equação 3.2.

$$\vec{P}_i(t_j) = (x_i(t_j), y_i(t_j)) \quad (3.2)$$

### Velocidade Escalar - $V_i(t_j)$

Velocidade escalar é caracterizada como a velocidade instantânea de um veículo em um determinado instante de tempo e é calculada pela razão entre a distância percorrida e o intervalo de tempo observado.

A velocidade escalar do  $i$ -ésimo veículo é definida por  $V_i(t_j)$  no instante de tempo  $t_j$ . Sua unidade de medida é dada em quilômetros por hora ( $Km/h$ ) por se tratar de um movimento veicular; caso o movimento fosse de pedestres, a unidade da velocidade seria dada em metros por segundo ( $m/s$ ). A velocidade  $V_i(t_j)$  pode ser calculada por:

$$V_i(t_j) = \frac{\sqrt{(P_{ix}(t_j) - P_{ix}(t_{j-1}))^2 + (P_{iy}(t_j) - P_{iy}(t_{j-1}))^2}}{t_j - t_{j-1}} \quad (3.3)$$

### Velocidade Média - $M(V_i)$

A velocidade média, por sua vez, é a média das velocidades observadas do  $i$ -ésimo

veículo avaliado, seu cálculo é feito pela divisão da soma das velocidades escalar deste veículo durante um intervalo de tempo específico  $[t_1, t_N]$  pelo número de amostras de velocidades  $N$  computadas. Essa medida é mostrada na Equação 3.4 e pode ser vista a seguir.

$$M(V_i) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N V_i(t_j) \quad (3.4)$$

### **Velocidade Média Final - $M(V)$**

Essa medida representa a velocidade média dos veículos avaliados. Sua definição é dada pela média da medida velocidade média  $M(V_i)$  de todos os  $K$  veículos avaliados. Seja  $M(V_i)$  a velocidade média calculada para o  $i$ -ésimo veículo desde o tempo inicial do seu percurso  $t_1$  até o tempo final do seu percurso  $t_F$ , o cálculo da Velocidade Média Final é dado pôr:

$$M(V) = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K M(V_i) \quad (3.5)$$

### **Aceleração Escalar - $A_i(t_j)$**

A aceleração escalar compreende a taxa de variação da velocidade do  $i$ -ésimo veículo durante um determinado intervalo de tempo. A aceleração  $A_i(t_j)$  pode ser definida como sendo a mudança no valor da velocidade escalar do veículo no instante de tempo  $t_j$  em relação ao instante anterior  $t_{j-1}$ . A aceleração é calculada por:

$$A_i(t_j) = \frac{\Delta V_i(t_j)}{\Delta t_j} = \frac{V_i(t_j) - V_i(t_{j-1})}{t_j - t_{j-1}} \quad (3.6)$$

No Sistema Internacional de Unidades (SI), a unidade da aceleração é dada em metro por segundo ao quadrado ( $m/s^2$ ). Neste trabalho, a desaceleração é considerada como uma aceleração negativa.

### **Aceleração Média - $M(A_i)$**

O conceito de aceleração média é conhecido como a média das acelerações observadas, ou seja, das variações da velocidade do veículo durante um intervalo de

tempo  $[t_1, t_T]$ . Seu cálculo é dado pela divisão da soma de todas as acelerações observadas durante o percurso do veículo pela quantidade de amostras de acelerações  $N$  computadas. Essa medida é descrita pela Equação 3.7 como pode ser visto a seguir:

$$M(A_i) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N A_i(t_j) \quad (3.7)$$

### **Aceleração Média Final - $M(A)$**

Seja  $M(A_i)$  a aceleração média do  $i$ -ésimo veículo, levando em consideração para o cálculo dessa medida todo o percurso feito pelo veículo, desde o início do percurso no tempo  $t_1$  até o final do percurso no tempo  $t_F$ . Assim, a aceleração média final  $M(A)$  pode ser obtida através da média da medida aceleração média calculada para todos os  $K$  veículos avaliados. A equação da aceleração média final é descrita da seguinte maneira:

$$M(A) = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K M(A_i) \quad (3.8)$$

### **Ângulo de Mudança de Direção - $\alpha_i(t_j)$**

Essa categoria se refere ao ângulo que o veículo faz ao mudar de direção no instante de tempo  $t_j$  (posição  $\vec{P}_i(t_j)$ ), dado que no instante de tempo  $t_{j-1}$  o veículo estava na posição  $\vec{P}_i(t_{j-1})$  e no instante de tempo  $t_{j+1}$  estava na posição  $\vec{P}_i(t_{j+1})$ . Esse ângulo pode ser calculado pela *Lei dos Cossenos* e sua aplicação pode ser verificada através de um exemplo demonstrado na Figura 3.1.

Nessa figura, a variável  $a$  assume o valor do módulo do vetor que corresponde a diferença entre as posições  $\vec{P}_i(t_{j+1})$  e  $\vec{P}_i(t_{j-1})$  do  $i$ -ésimo veículo, dado por  $a = |\vec{P}_i(t_{j+1}) - \vec{P}_i(t_{j-1})|$ . Analogamente, apresenta-se  $b = |\vec{P}_i(t_j) - \vec{P}_i(t_{j-1})|$  e  $c = |\vec{P}_i(t_{j+1}) - \vec{P}_i(t_j)|$ . Seja  $\beta_i(t_j)$  o ângulo oposto ao vetor  $\vec{a}$ , sua unidade de medida é dada em graus ( $^\circ$ ) e seu cálculo pode ser feito por:

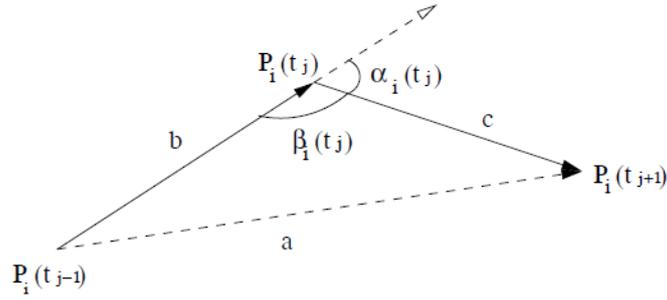


Figura 3.1: Exemplo geométrico de uma mudança de direção.

$$\beta_i(t_j) = \arccos\left(\frac{b^2 + c^2 - a^2}{2bc}\right) \quad (3.9)$$

O ângulo complementar de  $\beta_i(t_j)$  é definido por  $\alpha_i(t_j)$  e é calculado através da Equação 3.10 definida a seguir:

$$\alpha_i(t_j) = 180 - \beta_i(t_j) \quad (3.10)$$

### Ângulo Médio de Mudança de Direção - $M(\alpha_i)$

Esse conceito representa o valor médio do ângulo no qual o veículo avaliado muda de direção. Sua definição é feita pela divisão da soma dos ângulos de mudança de direção, obtidos durante o percurso do veículo analisado em um intervalo de tempo  $[t_1, t_T]$  pelo número de amostras de ângulos  $N$  observadas.

$$M(\alpha_i) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^T \alpha_i(t_j) \quad (3.11)$$

### Ângulo Médio Final de Mudança de Direção - $M(\alpha)$

Dado o ângulo médio de mudança de direção  $M(\alpha_i)$  do  $i$ -ésimo veículo, o ângulo médio final é calculado através da divisão da soma dos ângulos médios obtidos de cada veículo pelo número de veículos avaliados  $K$ . Esta medida define em média, qual foi o ângulo gerado por um veículo ao mudar de direção. A Equação 3.12 vista na sequência mostra o cálculo dessa medida.

$$M(\alpha) = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K \alpha_i \quad (3.12)$$

### Tempo de Pausa - $Tp_i(t_j)$

Tempo de pausa é o período consecutivo durante o qual o veículo permanece imóvel, ou seja, sua velocidade é igual a zero. Dessa forma, tem-se que para a posição  $P_i(t_j)$  de um veículo no instante de tempo  $t_j$  é igual a posição  $P_i(t_k)$  no instante  $t_k$ , onde  $j < k \leq T$ . Assim  $Tp_i(t_j)$  pode ser calculado por:

$$Tp_i(t_j) = t_k - t_j \quad (3.13)$$

$$se \quad \begin{cases} P_i(t_j) = P_i(t_{j+1}) = P_i(t_{j+2}) = \dots = P_i(t_{k-1}) = P_i(t_k) \\ P_i(t_k) \neq P_i(t_{k+1}) \quad e \\ t_k - t_j \leq \beta \end{cases}$$

Quando um veículo permanece em pausa por um longo período de tempo, ele pode ser considerado como se estivesse estacionado, com defeito, batido etc. Dessa forma, o tempo de pausa deve ser limitado superiormente por uma variável ( $\beta$ ) que representa o tempo máximo que um veículo pode permanecer com velocidade zero, sem que ele esteja definitivamente parado.

No trânsito, o tempo de pausa pode ser obtido com a ocorrência de frequentes engarrafamentos, carga e descarga de mercadorias, ou ainda pelo embarque e desembarque de passageiros.

### Pausa no Movimento - $p_i(t_j)$

Pausa no movimento representa a ocorrência de um tempo de pausa durante o movimento do veículo no instante de tempo  $t_j$ , para  $j$  variando de 1 a  $T$ . Dessa forma,  $p_i(t_j)$  assumirá o valor 1 (um) se  $Tp_i(t_j)$  for diferente de zero, ou assumirá o valor 0 (zero) caso contrário, como pode ser visto na equação a seguir:

$$p_i(t_j) = \begin{cases} 1, & se \quad Tp_i(t_j) \neq 0 \\ 0, & se \quad Tp_i(t_j) = 0 \end{cases} \quad (3.14)$$

### **Número de Pausas no Movimento - $N(p_i)$**

Descreve-se agora o número total de ocorrências de pausas no movimento do  $i$ -ésimo veículo durante um intervalo de tempo  $[t_1, t_T]$ . Seu cálculo é feito pela somatória da frequência dessas pausas e sua definição é dada por:

$$N(p_i) = \sum_{j=1}^T p_i(t_j) \quad (3.15)$$

### **Média do Tempo de Pausa - $M(T(p_i))$**

Dado que um veículo esteve em pausa durante um determinado período de tempo, essa medida representa na média, o tempo no qual o veículo permaneceu sem se movimentar. Seu cálculo é feito pela divisão da soma de todos os tempos de pausa ocorridos no movimento do  $i$ -ésimo veículo durante o intervalo  $[t_1, t_T]$  pelo número de ocorrências desses tempos de pausa  $N(p_i)$ . A equação da média amostral do tempo de pausa pode ser vista a seguir:

$$M(T(p_i)) = \frac{\sum_{j=1}^{N(p_i)} T p_i(t_j)}{N(p_i)} \quad (3.16)$$

### **Número Total de Pausas no Movimento - $N(p)$**

Tal conceito corresponde ao número de ocorrência de todas as pausas durante todos os percursos de todos os  $K$  veículos observados para um determinado cenário avaliado. Sua representação é dada como mostra a Equação 3.17.

$$N(p) = \sum_{i=1}^K N(p_i) \quad (3.17)$$

### **Média Final do Tempo de Pausa - $M(T(p))$**

Essa medida é definida pelo tempo de pausa médio no qual um veículo permanece sem se movimentar, levando em consideração a média de todos os tempos de pausa obtidos pelos  $K$  veículos avaliados. Seu cálculo é feito pela divisão da soma da média amostral do tempo de pausa de todos os  $K$  veículos observados pelo número de veículos analisados.

$$M(T(p)) = \frac{\sum_{j=1}^K M(T(p_i))}{K} \quad (3.18)$$

### Tempo de Parada - $TP(p_i(t_j))$

A definição dessa medida é atribuída a um veículo que permanece parado (sem se movimentar) por um longo período de tempo, ou seja,  $TP(p_i(t_j)) \leq \beta < TP(p_i(t_j))$ . O tempo de parada deve ser sempre maior do que o valor máximo permitido para um tempo de pausa feito por um veículo, no caso, maior que  $\beta$ . Logo, a posição do  $i$ -ésimo veículo  $P_i(t_j)$  no instante de tempo  $t_j$  é igual a posição  $P_i(t_k)$  no instante  $t_k$ , onde  $j < k$  e  $\beta < t_k - t_j$ . O cálculo do tempo de parada pode ser feito pôr:

$$TP(p_i(t_j)) = t_k - t_j \quad (3.19)$$

$$se \quad \begin{cases} P_i(t_j) = P_i(t_{j+1}) = P_i(t_{j+2}) = \dots = P_i(t_{k-1}) = P_i(t_k) \\ P_i(t_k) \neq P_i(t_{k+1}) \quad e \\ t_k - t_j > \beta \end{cases}$$

### Parada no Movimento - $p_i(t_j)$

Essa medida é calculada de forma similar às pausas no movimento, representa a ocorrência de um tempo de parada durante o movimento do veículo no instante de tempo  $t_j$  até o instante de tempo  $t_k$  em que o veículo começa a se movimentar, para  $j$  variando de 1 a  $T - \beta$  e  $k$  variando de  $j + \beta$  até  $T$ . Dessa forma,  $p_i(t_j)$  assumirá o valor 1 (um) se  $TP(p_i(t_j))$  for diferente de zero e maior que  $\beta$ , ou assumirá o valor 0 (zero) caso contrário.

$$p_i(t_j) = \begin{cases} 1, & se \quad TP(p_i(t_j)) \neq 0 \quad e \quad TP(p_i(t_j)) > \beta \\ 0, & se \quad TP(p_i(t_j)) = 0 \end{cases} \quad (3.20)$$

### Número de Paradas no Movimento - $NP(p_i)$

Essa medida é definida pelo número total de ocorrências de paradas no movimento do  $i$ -ésimo veículo durante um intervalo de tempo determinado  $[t_1, t_T]$ , sendo

que deve-se ter  $t_T - t_1 > \beta$ . Seu cálculo é feito pela somatória da ocorrência dessas paradas e sua definição é dada por:

$$NP(p_i) = \sum_{j=1}^T p_i(t_j) \quad (3.21)$$

### Número Total de Paradas no Movimento - $NP(p)$

Essa medida indica o número de ocorrências de todas as paradas durante todos os percursos de todos os  $K$  veículos observados. Sua representação pode ser vista a seguir:

$$NP(p) = \sum_{i=1}^K NP(p_i) \quad (3.22)$$

### Autocorrelação - $R(k)$

A autocorrelação [38, 39] indica o quanto o valor da instância de uma variável aleatória (componente do movimento) é capaz de influenciar suas instâncias vizinhas no tempo. A autocorrelação de uma variável aleatória  $X(t)$  dependente do tempo  $t$  e com média  $\mu$  é definida pela Equação 3.23 e será mostrada na sequência:

$$R(k) = \frac{E[(X_t - \mu)(X_{t+k} - \mu)]}{\sigma^2} \quad (3.23)$$

onde  $E[\ ]$  é o valor médio,  $k$  é o valor do deslocamento no tempo e  $\sigma$  é a variância da variável  $X(t)$ .

Em seguida, na próxima seção, será mostrada a metodologia utilizada neste trabalho para a realização da caracterização da mobilidade veicular e a sua utilidade como referência para a coleta, o tratamento e a visualização dos dados a serem caracterizados.

## 3.3 Metodologia Utilizada para a Caracterização da Mobilidade

Para que a análise da mobilidade seja aplicada de maneira correta e precisa aos registros de movimentação investigados, [37] propõe uma metodologia de manipulação dos dados a serem analisados, a qual servirá como referência para o estudo da mobilidade veicular neste trabalho. A escolha da utilização desta metodologia é justificada pelo fato de ser a única encontrada na literatura, a qual possibilita o pesquisador avaliar detalhadamente as características das movimentações de um dispositivo móvel investigado.

Esta metodologia é composta por tarefas organizadas em etapas de desenvolvimento, cuja execução cronológica dessas tarefas será primordial para a eficácia da caracterização da mobilidade. Entretanto, o nível de precisão da caracterização vai depender da escolha dos valores dos parâmetros relacionados à cada etapa da metodologia. As etapas dessa metodologia são descritas a seguir.

### 3.3.1 Definição dos Cenários de Observação

Essa etapa corresponde a definição das características do cenário a ser observado, sendo considerado essencial obter as seguintes informações:

- Tipo de cenário observado: consiste na identificação do local no qual os movimentos ocorrem, podendo ser: cidade, distrito, bairro, rodovia etc;
- Tamanho da área que se encontra o cenário onde os experimentos serão realizados;
- Intervalo de tempo para a observação dos movimentos;
- Tipos de dispositivos móveis existentes no cenário observado e a identificação de quais serão avaliados: a movimentação desses dispositivos pode se dar por pedestres, carros, motos, aviões etc;

- Quantidade de cada tipo de dispositivo que será avaliado.

### 3.3.2 Captura e Processamento dos Dados

Nessa etapa são definidos os procedimentos de captura e tratamento dos dados, sendo que as amostras de mobilidade escolhidas devem ser independentes, ou seja, cada amostra deve ser de um usuário diferente. Essa etapa é importante para evitar, durante a análise dos dados, a ocorrência de resultados que não correspondam a realidade da mobilidade no cenário observado.

Para obter de forma precisa as posições dos movimentos observados ao longo do tempo, é preciso utilizar um dispositivo de localização que informe e grave em pequenos intervalos de tempo, as posições percorridas durante o movimento. A ferramenta mais conhecida e utilizada para essa finalidade é o Sistema de Posicionamento Global (Global Positioning System - GPS), o qual deve possuir a funcionalidade de gravar as posições percorridas de forma exata e em menores intervalos de tempo possíveis.

Como um sistema GPS utiliza ondas eletromagnéticas na atmosfera para a transmissão dos dados, ele está sujeito a erros no cálculo da posição do dispositivo ou a perda de sinal com os satélites durante o seu funcionamento. Dessa forma, caso os dados capturados pelo GPS apresentem posições atípicas ou ainda apresente a falta de posições durante um determinado intervalo de tempo, esses dados devem passar pelo processo de filtragem.

O processo de filtragem das amostras consiste na escolha dos dados que serão efetivamente utilizados na caracterização. Conseqüentemente, serão descartados aqueles registros de movimentos obtidos que apresentem valores discrepantes, ou seja, que apresentem uma variação muito grande nas posições do dispositivo durante um pequeno intervalo de tempo, não correspondendo assim a realidade. Também serão descartados os registros que apresentem ausência das posições durante um grande intervalo de tempo, ou seja, falta de informações relativas às posições do dispositivo devido à falta de comunicação do GPS com os satélites.

### 3.3.3 Análise Estatística dos Dados

O objetivo dessa etapa é obter maiores informações sobre os movimentos capturados, dessa forma será aplicado a análise estatística nos componentes do movimento e nas medidas de interesse avaliadas.

Nessa etapa, a análise dos dados consiste em calcular vários valores estatísticos para os componentes da mobilidade, tais como: desvio-padrão, variância, coeficiente de variação, valores mínimo e máximo, autocorrelação dos componentes, função de distribuição de probabilidade empírica (*empirical probability distribution function* - EPDF) e função de distribuição cumulativa empírica (*empirical cumulative distribution function* - ECDF) [40, 41, 42]. O conhecimento acerca desses valores é importante para entender o comportamento dos movimentos dos veículos, e as informações sobre essa mobilidade poderá posteriormente ser usada como parâmetros de entrada em modelos de mobilidade veicular já existentes, ou ainda, poderá auxiliar na criação de novos modelos sintéticos mais realistas.

### 3.3.4 Identificação de Padrões de Comportamento

Essa fase tem a finalidade de identificar a ocorrência de movimentos que seguem algum tipo de padrão de comportamento, obtendo assim as informações necessárias para tornar possível uma representação mais realista da mobilidade analisada.

Após obter os dados necessários sobre o comportamento dos movimentos, para cada componente dos mesmos, será investigada alguma distribuição de probabilidade conhecida na literatura que mais se aproxime do comportamento do componente do movimento avaliado. A identificação dessas distribuições poderá auxiliar na criação de modelos de mobilidade veicular mais realistas, cujos componentes do movimento poderão seguir uma distribuição real.

### 3.3.5 Visualização dos Resultados Encontrados

A maneira como será feita a visualização do comportamento da mobilidade identificado na etapa anterior, juntamente com a maneira como esse comportamento será interpretado, são os objetivos a que se destina essa etapa. Assim, tal etapa tende a facilitar a forma com que os resultados serão gerados, possibilitando consequentemente uma melhor compreensão do movimento analisado.

Os resultados encontrados poderão ainda ser agrupados a fim de tornar mais viável a representação do comportamento da mobilidade; a visualização desses resultados poderá ser feita graficamente de maneira a facilitar o entendimento do movimento avaliado.

## 3.4 Descrição dos Experimentos

Existem várias aplicações e funcionalidades atribuídas ao uso de uma rede veicular, dentre elas a capacidade do deslocamento rápido e longínquo da informação, carregada pelos veículos para locais afastados dos centros urbanos. Esse tipo de rede se adequaria muito bem à função de interligar pessoas (usuários) afastadas geograficamente e isoladas tecnologicamente. As cidades que possuem muitos bairros afastados dos centros, deixando a população ali presente excluídas da informação, se torna um cenário ideal para a presença de uma rede veicular.

Neste tipo de cenário, uma rede veicular poderia se formar através do transporte público urbano, já que em alguns intervalos de tempo, os ônibus são uma forma de ligação constante entre as diversas áreas de uma cidade. Nesse caso, seria atribuída aos ônibus a tarefa de transportar, além dos passageiros, a informação e as mensagens pertencentes aos habitantes das regiões mais afastadas da cidade. Dessa forma, cada ônibus deveria carregar os dispositivos necessários para permitir a comunicação e o armazenamento das mensagens recebidas e encaminhadas pelos usuários da rede. Esse cenário servirá como base para a realização dos estudos feitos neste trabalho em relação as redes veiculares.

Para que os pesquisadores tenham precisão e confiabilidade nos resultados encontrados ao estudar uma rede veicular para este tipo de cenário, é essencial que a mobilidade dos veículos presentes na rede seja real, ou que pelo menos, utilizem modelos de mobilidade realistas para representar esse tipo de rede. Dessa forma, foram capturados registros reais da mobilidade veicular, obtidos através de um dispositivo GPS, os quais servirão como parâmetros de entrada para representar a mobilidade da rede veicular investigada, e possibilitarão as análises quantitativas e qualitativas da mobilidade e da rede veicular estudada.

### 3.4.1 Ambiente de Coleta da Mobilidade

Os registros reais da mobilidade veicular (*traces*) capturados foram obtidos através do transporte urbano feito pelos ônibus públicos na cidade de Muriaé, localizada na Zona da Mata Mineira, contando com aproximadamente 100 mil habitantes, segundo dados do censo feito pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) em 2009 [43]. Esta cidade foi escolhida para a realização dos experimentos por possuir um transporte público que oferece interligamento de todas as regiões afastadas do seu centro urbano. Dessa maneira, essa cidade pode representar o cenário definido para a realização dos experimentos com as redes veiculares, e tornar possível a conexão entre os usuários de uma rede distantes geograficamente.

A Coletivo Muriaeense, empresa responsável pelo transporte público urbano na cidade, fragmenta atualmente o transporte municipal em 15 linhas de ônibus, das quais 25 ônibus circulam diariamente. Neste trabalho, através de um dispositivo GPS, foram coletados todos os diferentes *traces* feitos pelas 15 linhas de ônibus públicos urbanos da Coletivo Muriaeense ao longo do dia. Os registros adquiridos foram capturados entre agosto e outubro de 2009 nos horários que compreendem entre 5:40 da manhã até 23:30 da noite. Para tal, o autor deste trabalho, de posse do dispositivo GPS, percorreu todos esses diferentes trajetos armazenando em arquivo todos os *traces* feitos pelos ônibus.

Neste trabalho, um trajeto é considerado o percurso que se inicia no ponto de

partida da linha ao qual o ônibus pertence e termina no ponto final daquela linha. O percurso de volta, feito pelo mesmo ônibus, do ponto final ao ponto inicial da linha, é considerado um novo trajeto feito pelo mesmo ônibus. Um ônibus, ao longo do dia, ao seguir o itinerário de viagem da linha ao qual pertence, pode passar por diferentes áreas. Um exemplo disso seria a linha São Francisco (ver Tabela 3.1), que em determinados horários pré-estabelecidos passa pelo bairro Recanto Verde, e em outros horários não passa por esse bairro.



Figura 3.2: Comportamento da mobilidade veicular no cenário investigado.

Para que os registros analisados fossem representativos, foram capturados de cada linha de ônibus, todos os diferentes trajetos possíveis de serem feitos pelos ônibus ao circular durante um dia. Dessa maneira, foram capturados ao todo 32 registros de mobilidade referentes a todos os diferentes trajetos percorridos pelos ônibus, sendo que cada trajeto foi percorrido por um motorista distinto. Na Figura 3.2, é possível visualizar de forma conjunta todos os trajetos percorridos pelos ônibus

no mapa da cidade de Muriaé (indicados de azul), assim como o nome dos bairros pelos quais os ônibus trafegam. Em seguida, na Tabela 3.1 é mostrado os horários de partida dos ônibus de todas as 15 linhas; também é indicada a quantidade de ônibus presentes em cada linha e os locais de partida dos ônibus.

Tabela 3.1: Horário e local de partida de todas as 15 linhas de ônibus.

Linha	Nº de Ônibus	Local de Partida	Horários															
			5:40	07:10	08:40	10:00	11:40	13:20	15:10	17:10	18:50	20:40	22:30					
Aeroporto	1	Aeroporto	06:20	08:00	09:20	10:50	12:30	14:20	16:10	18:00	19:50	21:30						
		Marambaia																
Bela Vista	2	Bela Vista e Centro	06:05	06:35	07:05	07:35	08:15	09:00	09:40	10:20	11:05	11:35	12:05	12:35	13:10	13:50	14:30	15:10
Cardoso de Melo	2	Cardoso de Melo e São Pedro	06:00	06:30	07:00	07:40	08:20	09:00	09:40	10:20	11:00	11:40	12:20	13:00	13:40	14:20	15:00	15:40
			16:20	17:00	17:40	18:20	19:00	19:40	20:20	21:00	21:40	22:20	23:00					
Circular	1	Barra	06:00	07:00	08:10	09:40	11:00	12:00	13:20	15:00	16:00	17:00	18:30	19:40	21:00	22:00	23:00	
		Centro	6:30*	07:40	09:00	10:20*	11:30	12:30*	14:20*	15:30	16:30	17:50*	19:00	20:20	21:30	22:30*	**Panela Quente	
Encoberta	1	Rodoviária	06:00	06:40	07:20	08:00	08:40	09:30	10:20	11:00	11:30	12:00	12:40	13:20	14:00	14:40	15:20	16:00
			16:40	17:20	18:00	18:40	19:20	20:00	20:40	21:20	22:00	23:00						
Gaspar	2	Gaspar e Primavera	05:50	06:20	07:00	07:50	08:40	09:30	10:20	11:00	11:40	12:20	13:10	14:00	14:50	15:30	16:10	17:00
			17:40	18:20	19:10	20:00	20:50	21:40	22:20	23:00								
Inconfidência	2	Inconfidência II e Joanópolis	06:00	06:30	07:00	07:30	08:10	08:50	09:30	10:10	10:50	11:30	12:00	12:30	13:20	14:10	15:00	15:50
			16:40	17:20	18:00	18:40	19:20	20:00	21:00	22:00	22:40							
João XXIII	2	Barra e Centro	06:00	06:30	07:00	07:30	08:20	09:00	09:40	10:20	11:00	11:35	12:05	12:35	13:20	14:00	14:40	15:20
			16:00	16:40	17:20	18:00	18:30	19:20	20:00	20:40	21:20	22:10	23:00					
Napoleão	1	Napoleão	06:00	07:00	08:20	09:40	11:00	12:20	13:40	15:00	16:20	17:40	19:00	20:20	22:00			
		São Cristóvão	6:20*	07:40	09:00	10:20*	11:40*	13:00*	14:20	15:40	17:00*	18:20	19:40	21:20	22:30	* Indo até o Divisório		
Patrimônio S.J.	2	Lelente e Santa Terezinha	06:00	06:30	07:20	08:10	09:00	09:50	10:40	10:40	11:20	12:00	12:50	13:40	14:30	15:20	16:10	
			17:00	17:50	18:40	19:30	20:20	21:10	22:00	22:40								
Planalto	2	Barra	06:15	06:30	06:45	07:15	07:30	08:00	08:40	09:20	10:00	10:20	10:45	11:15	11:30	11:45	12:15	12:30
			12:45	13:20	14:00	14:40	15:20	16:00	16:40	17:20	18:00	18:40	19:20	20:00	20:40	21:20	22:00	22:30
		Centro	06:15	06:45	07:15	08:00	08:20	08:40	09:20	09:40	10:00	10:45	11:00	11:15	11:45	12:00	12:15	12:45
			13:20	14:00	14:40	15:20	16:00	16:40	17:10	18:00	18:40	19:20	20:00	20:40	21:20	22:00	22:30	23:05
Santana	4	Santana e Centro	06:00	06:15	06:30	06:45	07:00	07:15	07:30	07:45	08:00	08:20	08:40	09:00	09:20	09:40	10:00	10:20
			10:40	11:00	11:20	11:40	12:00	12:20	12:40	13:00	13:20	13:40	14:00	14:20	14:40	15:00	15:20	15:40
			16:00	16:20	16:40	17:00	17:20	17:40	18:00	18:20	18:40	19:00	19:20	19:40	20:00	20:20	20:40	21:00
			21:20	21:40	22:00	22:30	23:30	23:30										
São Francisco	1	Rodoviária	6:00*	6:40*	7:20*	08:10	9:00*	09:40	10:20	11:00*	11:50	12:20*	13:10*	14:00	14:50*	15:40*	16:30	17:20*
			18:10*	19:00*	19:50	20:40*	21:30	22:20*	23:00									
São Joaquim X Marambaia	1	São Joaquim	06:30	07:40	09:10	10:30	11:50	13:10	14:50	16:20	17:50	19:10	20:30	21:50				
		Marambaia	06:00	07:00	08:30	09:50	11:10	12:30	14:00	15:30	17:00	18:30	19:50	21:10	22:30			
São Joaquim X Santo Antônio	1	Santo Antônio	06:30	07:40	09:10	10:30	11:50	13:10	14:50	16:20	17:50	19:10	20:30	21:50				
		São Joaquim	06:00	07:00	08:30	09:50	11:10	12:30	14:00	15:30	17:00	18:30	19:50	21:10	22:30			

O dispositivo GPS, utilizado para capturar os registros das movimentações dos ônibus, foi um Apontador G8 [44] (Figura 3.3), fabricado pelo Grupo Unicoba <sup>1</sup>. Através deste dispositivo, foi possível obter as posições em coordenadas geográficas dos movimentos dos ônibus em tempo real, gravadas em arquivo a cada intervalo de tempo definido para a captura das posições, que ocorreu a cada 2 segundos. Durante a coleta dos dados, em nenhum momento foi identificada a perda de sinal entre o GPS e os satélites, conseqüentemente após a análise dos *traces* no laboratório Redes de Alta Velocidade - RAVEL<sup>2</sup> da UFRJ, nenhum movimento atípico foi observado,

<sup>1</sup>Mais detalhes sobre o dispositivo GPS utilizado poderão ser encontrados em [http://www.apontadorgps.com.br/apt\\_g8.html](http://www.apontadorgps.com.br/apt_g8.html)

<sup>2</sup>Mais detalhes sobre o laboratório poderá ser encontrado em <http://www.ravel.ufrj.br>

evitando assim que os mesmos precisassem ser corrigidos.



Figura 3.3: GPS utilizado no experimento.

Para a análise da mobilidade, foi desenvolvido um programa na linguagem JAVA, utilizado para processar os registros obtidos. Através deste programa, verificou-se a não ocorrência de dados atípicos, fazendo com que os registros não precisassem passar pelo processo de filtragem e eliminação de dados. Em seguida, para os 32 registros analisados, o mesmo programa em JAVA [45] calculou os valores de cada componente do movimento veicular estudado. De posse dos valores instantâneos para cada componente do movimento de todos os trajetos capturados, a ferramenta MATLAB [46] foi utilizada para a geração e visualização dos resultados estatísticos da mobilidade investigada, os quais serão apresentados na seção seguinte.

### 3.5 Resultados Empíricos

Nesta seção serão mostrados todos os resultados estatísticos calculados para cada componente extraído do movimento real. A visualização desses resultados está diretamente relacionada com o comportamento da mobilidade veicular estudada. Assim, as medidas: média final (Seção 3.2), variância, desvio padrão, coeficiente de variação, valor mínimo, valor máximo e a quantidade de amostras de cada componente do movimento real foram obtidas e são mostradas na Tabela 3.2.

Foi realizada também uma análise das características da função de distribuição de

Tabela 3.2: Medidas de interesse de cada componente do movimento veicular.

Medida	Vel (Km/h)	Acel (m/s <sup>2</sup> )	Ângulo (°)	Pausa (s)
Média	22,6473	0,0278	7,2843	7,2598
Máximo	83,4434	3,3182	177,9863	168
Mínimo	2,001	-2,7715	0	1
Variância	144,8316	0,2904	124,1474	125,541
Desvio Padrão	12,0346	0,5389	11,1421	11,2045
Coefficiente de Variação	0,5314	19,3664	1,5296	1,5434
Número de Amostras	23058	23058	23058	839

probabilidade empírica de cada componente do movimento, já que esta é muito importante tanto para a consolidação dos resultados obtidos quanto para a observação dos dados capturados de maneira mais completa. Assim, as funções de distribuição de probabilidade empírica para cada componente dos dados reais foram computadas e serão mostradas na sequência, juntamente com a análise do comportamento dos componentes do movimento veicular.

### 3.5.1 Velocidade

A visualização da EPDF do componente velocidade, referente aos dados reais obtidos, pode ser feita pela Figura 3.4. Percebe-se através dessa figura a não ocorrência de velocidades com valores zero ou próximos de zero. Isso se deve ao fato de termos considerado um ônibus com velocidade igual a zero quando a sua velocidade for inferior a  $2Km/h$  em um intervalo de tempo de captura (2 segundos). Essa consideração foi feita baseando-se na falta de exatidão no cálculo das posições feito pelo dispositivo, no qual verificou-se a possibilidade de ocorrer pequenas variações nas coordenadas geográficas do receptor GPS durante um intervalo de tempo do qual, foi constatado que o ônibus estava realmente parado. Apesar das diferenças de posições inserirem-se na casa dos centímetros, o dispositivo poderia ter sido considerado em movimento e isso influenciaria na distribuição da velocidade, caso esta não tenha sido limitada inferiormente como especificado.

Através da análise desta distribuição, conclui-se que em 74% do tempo os ônibus permanecem entre as velocidade de  $10Km/h$  e  $35Km/h$ , e que a velocidade média

final obtida por eles foi de  $22\text{Km/h}$ . As maiores velocidades observadas foram obtidas quando os ônibus da linha Circular e Bela Vista transitavam pela Rodovia Federal BR-116, sendo que a velocidade máxima encontrada foi de  $83\text{Km/h}$  e a velocidade mínima encontrada, como era de se esperar, foi de  $2\text{Km/h}$ . Também pode se observar que em somente  $1,3\%$  do tempo os ônibus transitavam com velocidades superiores a  $60\text{Km/h}$ , levando-nos a concluir que, em geral, os ônibus transitam com velocidades baixas e inferiores a  $60\text{Km/h}$ .

O valor do coeficiente de variação associado a velocidade indica também que o conjunto de dados analisado é muito heterogêneo, podendo se afirmar que os desvios relativos à média da velocidade atingem a aproximadamente  $50\%$  dos valores obtidos.

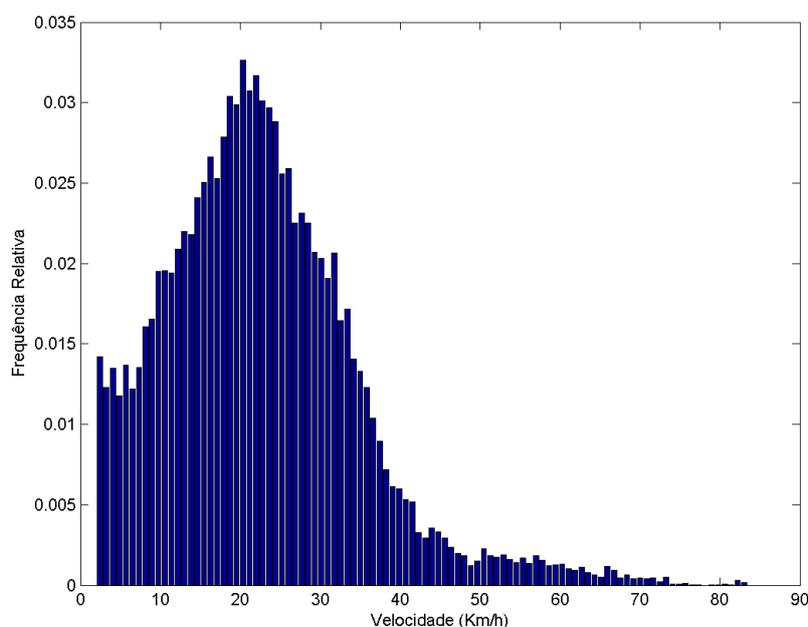


Figura 3.4: Função de distribuição de probabilidade empírica da velocidade.

### 3.5.2 Aceleração

Ao analisar a distribuição de probabilidade empírica do componente aceleração (Figura 3.5), pode-se observar que em  $70\%$  do tempo as acelerações são suaves e estão entre  $-0,5\text{m/s}^2$  e  $0,5\text{m/s}^2$ . Vale lembrar que para efeito de cálculo e visualização, as desacelerações foram consideradas como acelerações negativas.

A aceleração máxima observada foi de  $3,32m/s^2$  e a desaceleração máxima foi de  $-2,77m/s^2$ , mostrando uma maior ocorrência de acelerações bruscas do que das desacelerações bruscas durante o movimento. Foi verificado que acelerações de maiores intensidades acontecem normalmente em momentos quando o ônibus está arrancando, logo após estar parado ou em pausa. Desse modo, o ônibus tende a acelerar satisfatoriamente até ganhar velocidade suficiente para transitar na via; posteriormente o ônibus tende a manter tal velocidade, havendo apenas suaves acelerações e desacelerações, até que ele tenha que parar novamente. Analogamente, as desacelerações de maiores intensidades ocorrem normalmente quando o ônibus tende a estacionar, ocorrendo assim as freadas bruscas.

Dentre as 23058 amostras de acelerações/desacelerações analisadas, constatou-se que 13052 amostras são associadas às acelerações, enquanto que 10006 amostras são associadas às desacelerações. O maior número de amostras encontrado para a aceleração sugere que em 57% do tempo os ônibus estão acelerando, enquanto que em 43% do tempo eles estão em processo de desaceleração. As desacelerações podem ocorrer durante uma frenada do ônibus ou devido à perda de velocidade pela força de atrito que age no veículo.

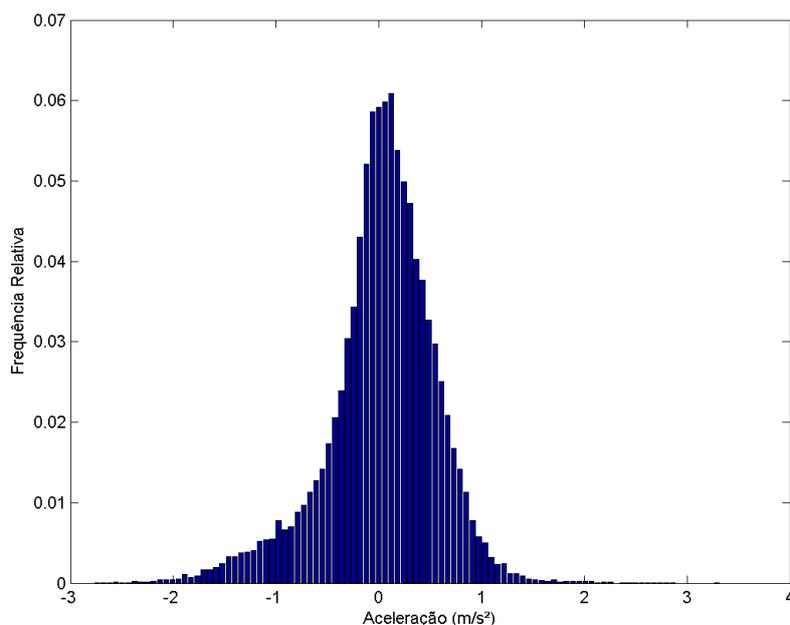


Figura 3.5: Função de distribuição de probabilidade empírica da aceleração.

### 3.5.3 Ângulo de Mudança de Direção

Mudanças suaves na direção ocorrem na maior parte do tempo durante as movimentações dos ônibus; tal fato pode ser verificado através da observação da distribuição do componente ângulo de mudança de direção (Figura 3.6), a partir do qual foi possível identificar a predominância de pequenos valores durante a sua análise.

A média final do ângulo de mudança de direção foi de  $7^\circ$ , sendo que 79% dessas mudanças ocorridas são pequenas e variam de  $0^\circ$  até  $10^\circ$ . Como era esperado, o menor ângulo encontrado foi de  $0^\circ$ , representando nenhuma mudança na direção do veículo. Já o maior ângulo encontrado foi de  $177^\circ$ , considerada uma mudança brusca na direção do veículo.

Apesar de uma curva ser de aproximadamente  $90^\circ$  em geral, somente em 0,9% das mudanças de direções ocorridas, a curva foi maior que  $50^\circ$ . A explicação para esse acontecimento pode ser dada pelo fato de que, na maior parte do tempo, os ônibus estão transitando em linha reta; e também pelo fato que o valor do intervalo de observação das posições do veículo (2 segundos), que muitas das vezes pode não ser o suficiente para que um veículo faça uma curva completa, faz com que o ângulo de mudança de direção para essa curva seja dividido em dois ou mais ângulos de menor valor.

A fim de analisar a influência do intervalo de observação no comportamento da distribuição do ângulo de mudança de direção, foi alterado o intervalo de tempo utilizado para capturar as posições dos veículos. Assim, poderíamos observar uma maior ocorrência de ângulos de maiores intensidades quando o intervalo de tempo utilizado for, por exemplo, a cada 4 segundos, ou a cada 6 segundos. Essa análise será feita na Seção 3.6.

### 3.5.4 Tempo de Pausa

A distribuição do tempo de pausa encontrada pode ser vista pela Figura 3.7. Foi considerado neste trabalho que uma pausa feita pelos veículos não pode ultrapassar

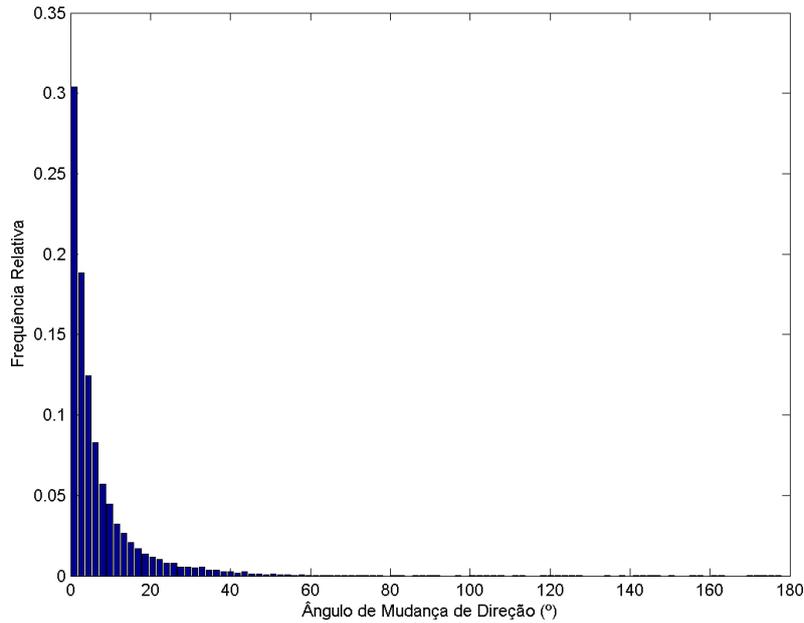


Figura 3.6: Função de distribuição de probabilidade empírica do ângulo de mudança de direção.

o período de tempo de 3 minutos. Caso o ônibus tenha ficado imóvel por mais de 3 minutos, considera-se esse tempo como um tempo de parada, não sendo computado na distribuição de probabilidade do tempo de pausa.

Embarque e desembarque de passageiros são os motivos mais comuns para que um ônibus faça um tempo de pausa, no entanto, esse tempo se deve também ao fato da ocorrência de engarrafamentos, do encontro de sinais vermelhos no trânsito etc. O tempo de pausa médio final observado foi de 7 segundos, sendo que 95% dos tempos de pausa ocorridos foram de até 20 segundos.

Valores altos para tempos de pausa são encontrados esporadicamente e são tomados como uma ocorrência atípica no trânsito, podendo ser explicados pelo alto grau de engarrafamento, pela quantidade significativa de passageiros embarcando ou desembarcando, ou ainda por algum outro problema que o motorista tenha tido no trânsito, impedindo assim o seu movimento por alguns minutos.

Como se podia prever, o menor tempo de pausa encontrado foi de 1 segundo; já o maior tempo de pausa encontrado foi de 168 segundos. Somente 1% dos tempos de pausa avaliados foram maiores que 40 segundos, predominando, dessa forma, as

pequenas pausas durante os movimentos dos ônibus.

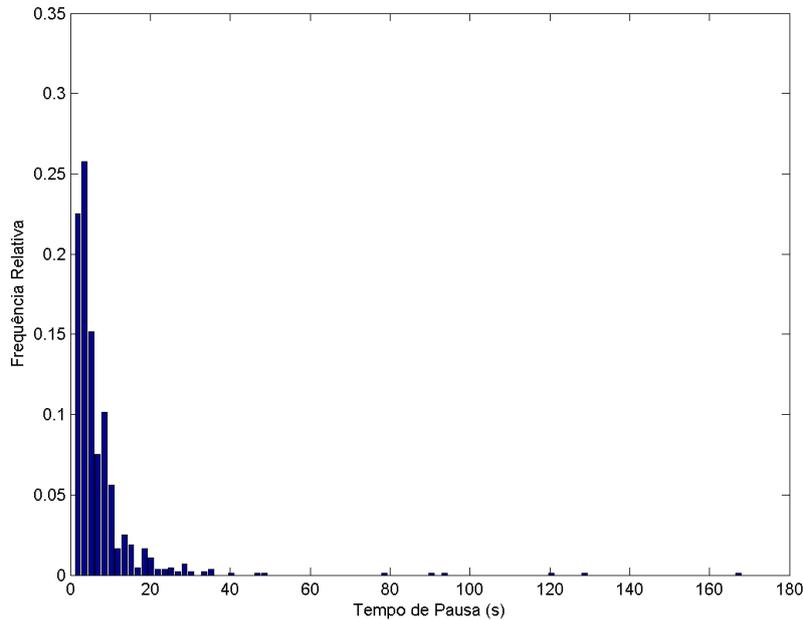


Figura 3.7: Função de distribuição de probabilidade empírica do tempo de pausa.

### 3.5.5 Autocorrelação

A observação da autocorrelação referente aos valores obtidos para cada componente do movimento veicular coletado se torna relevante ao analisar a ocorrência de dependências temporais de tais componentes. A autocorrelação é definida pela medida que indica o quanto o valor da instância de uma variável aleatória (componente do movimento) é capaz de influenciar suas instâncias vizinhas no tempo.

O valor da autocorrelação pode variar de  $[-1; 1]$ , sendo que quando a autocorrelação apresenta valores iguais ou próximos a  $-1$ , isso indica que há uma autocorrelação negativa, ou seja, as instâncias vizinhas são extremamente diferentes. Valores iguais ou próximos a 1 sinalizam que há autocorrelação positiva, ou seja, as instâncias são similares às instâncias adjacentes. Já se o valor estiver próximo a zero, o indício é de que não há autocorrelação, nem positiva e nem negativa.

Os resultados obtidos da autocorrelação para cada componente do movimento são mostrados na Figura 3.8. Altos valores observados pela componente velocidade, principalmente nos menores intervalos de observação entre as amostras, mostram

que a velocidade possui uma alta dependência temporal, ou seja, os valores da velocidade de um ônibus em intervalos de tempo próximos (até 10 segundos) estão altamente correlacionados. Isto acontece também com os componentes ângulo de mudança de direção e tempo de pausa, visto que apresentaram uma autocorrelação aproximadamente entre  $[0;0.15]$  e  $[0;0.3]$  respectivamente, nos menores intervalos de tempo entre as amostras. O componente aceleração obteve autocorrelação negativa nos primeiros segundos e, posteriormente próximo a zero, indicando ausência de dependência temporal entre as instâncias vizinhas desse componente.

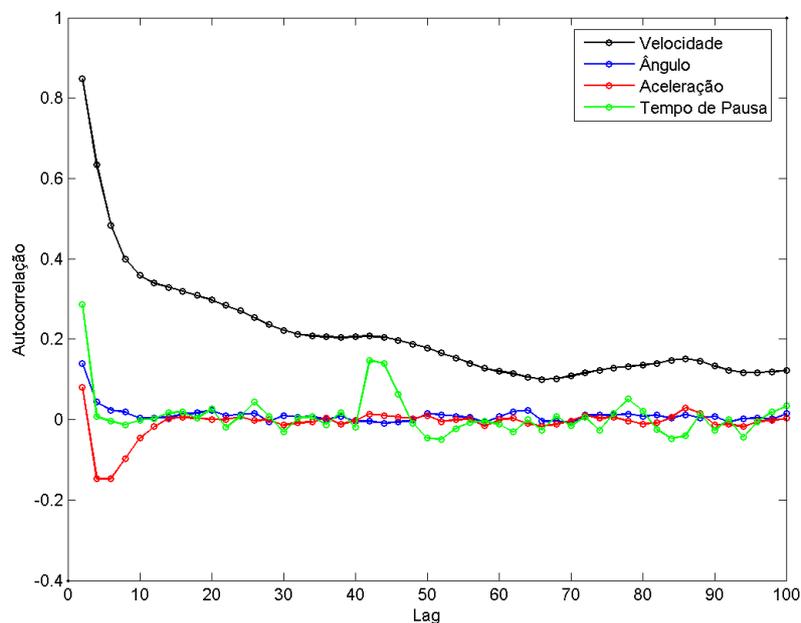


Figura 3.8: Autocorrelação de cada componente do movimento veicular.

### 3.6 Análise do Comportamento da Mobilidade em Relação ao Intervalo de Tempo de Captura das Posições

Os resultados obtidos para a caracterização da mobilidade estão diretamente ligados ao intervalo de tempo durante o qual houve a captura das posições do dispositivo presente nos veículos; quanto menor o intervalo, mais detalhes são extraídos da mobilidade analisada. Em contrapartida, quando não se tem informações preci-

sas sobre às posições dos veículos, pouco se pode concluir em relação a mobilidade veicular investigada, além de fazer com que a avaliação da rede em questão seja prejudicada pela falta de exatidão dos resultados.

Tabela 3.3: Comparação da mobilidade quando capturada em diferentes intervalos de tempo.

Medida	Intervalo de Observação	Média	Máximo	Mínimo	Variância	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação
Vel (Km/h)	2 segundos	22,6473	83,4434	2,001	144,8316	12,0346	0,5314
	4 segundos	22,4032	83,0171	2,001	145,4491	12,0602	0,5383
	6 segundos	23,414	81,9173	2,0038	176,1217	13,2711	0,5668
	8 segundos	24,6364	81,9886	2,0026	220,7805	14,8587	0,6031
	10 segundos	24,3669	81,315	2,0057	234,8636	15,3253	0,6289
Acel (m/s <sup>2</sup> )	2 segundos	0,0278	3,3182	-2,7715	0,2904	0,5389	19,3664
	4 segundos	0,0332	3,3374	-2,3563	0,1906	0,4365	13,167
	6 segundos	0,0227	2,0861	-3,37	0,1447	0,3804	16,788
	8 segundos	0,008	2,3016	-3,417	0,1316	0,3627	45,097
	10 segundos	-0,0029	3,3642	-3,3629	0,1372	0,3703	-125,9286
Ângulo (°)	2 segundos	7,2843	177,9863	0	124,1474	11,1421	1,5296
	4 segundos	11,2958	179,9004	0	281,3538	16,7736	1,4849
	6 segundos	14,0976	176,1666	0	383,2587	19,577	1,3887
	8 segundos	16,9153	179,3237	0	495,9779	22,2706	1,3166
	10 segundos	19,9572	179,75	0	572,4542	23,926	1,1989
Pausa (s)	2 segundos	7,2598	168	1	125,541	11,2045	1,5434
	4 segundos	4,1234	161	1	74,5915	8,6366	2,0945
	6 segundos	3,178	136	1	79,0464	8,8908	2,7976
	8 segundos	3,1872	143	1	127,2872	11,2822	3,5398
	10 segundos	2,7888	114	1	97,8131	9,8901	3,5464

Nessa seção será feita uma análise das características da mobilidade em relação a sua obtenção por diferentes intervalos de tempo de captura das posições. O objetivo desta análise é investigar a influência do intervalo de tempo nas informações extraídas da mobilidade, e também mostrar a importância de se obter *traces* com os registros das posições em menores intervalos de tempo possíveis para que a caracterização da mobilidade em destaque seja precisa e detalhada.

A partir de agora, a fim de simplificar as denominações, será chamado de **intervalo de observação** aquele intervalo de tempo de captura das posições mencionado

anteriormente.

Como os *traces* capturados pelo pesquisador continham informações sobre as posições dos veículos a cada 2 segundos, foi preciso manipular tais arquivos eliminando de forma coordenada algumas posições com o propósito de simular que os mesmos fossem capturados a cada 4, 6, 8 ou 10 segundos. Em seguida, foi realizado o cálculo estatístico para cada componente do movimento avaliado, considerando como dados de entrada os diferentes *traces* gerados, cada um com um intervalo de tempo de captura diferente. Na Tabela 3.3 é mostrada uma comparação dos resultados estatísticos para os componentes do movimento, variando o intervalo no qual as posições foram registradas nos *traces* capturados.

Em seguida, para que se possa fazer uma melhor análise dos valores encontrados nas distribuições de cada componente do movimento ao variar o intervalo do tempo de observação, tais valores serão visualizados e comparados através de suas funções de distribuição cumulativa empírica.

### 3.6.1 Velocidade

Para a velocidade, a medida que o intervalo de tempo aumenta, observa-se um pequeno aumento no valor de sua média e uma pequena queda do valor máximo encontrado para esse componente (ver Tabela 3.3). Dessa forma, a média que era de aproximadamente de  $22Km/h$  quando o intervalo de observação era de 2 segundos saltou para  $24Km/h$  com o intervalo de 10 segundos. Em contrapartida, o maior valor encontrado, que era de  $83Km/h$ , passou a ser  $81Km/h$  com o intervalo de observação de 10 segundos. Pode-se perceber também, através do aumento do desvio padrão e do coeficiente de variação, que os dados tendem a ficar mais dispersos e longe da média. O valor mínimo encontrado também mostrou uma tendência de aumento de seu valor, já que quanto maior for o intervalo de observação, menor a quantidade de valores de velocidades estarão disponíveis.

Observando as ECDFs desse componente, Figura 3.9, podemos identificar a dispersão dos dados e assim, concluir que até a velocidade de  $25Km/h$ , as ECDFs são

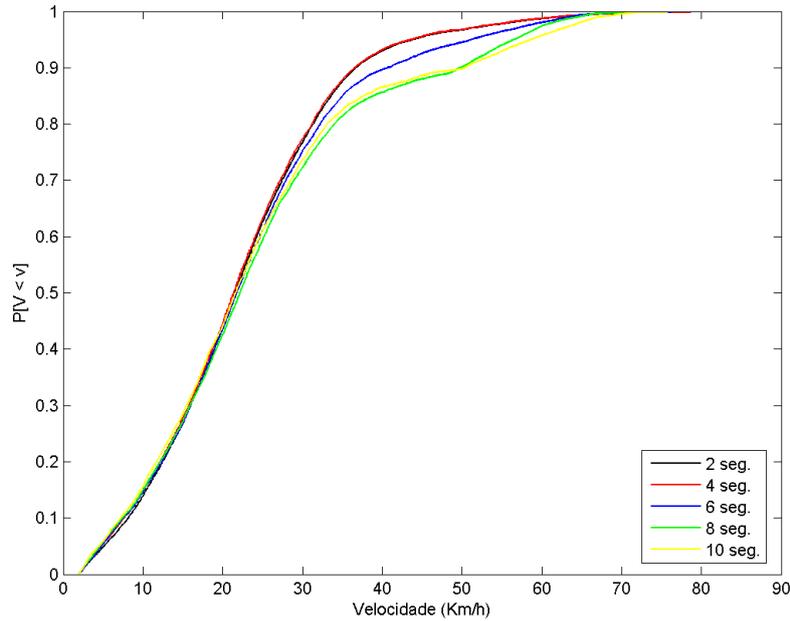


Figura 3.9: Funções de distribuição cumulativa empírica da velocidade sob diferentes intervalos de tempo de captura das posições.

praticamente idênticas. No entanto, a partir deste valor, observa-se que a medida que o intervalo de tempo aumenta, é maior também a probabilidade de encontrar velocidades mais altas.

### 3.6.2 Aceleração

Verifica-se para a aceleração uma tendência de queda da média de acordo com o incremento do intervalo de observação das posições do dispositivo, indicando portanto, uma predominância de valores mais altos para as desacelerações do que para as acelerações. Assim sendo, a média que era de  $0.0278m/s^2$ , para o intervalo de observação de 2 segundos, passou a ser de  $-0.0029m/s^2$ , com o intervalo de 10 segundos. O aumento do maior valor da desaceleração, indicado principalmente pela verificação do valor mínimo encontrado para o componente aceleração, saltou de  $-2.77m/s^2$  (intervalo de observação de 2 segundos) para  $-3.36m/s^2$ , quando o intervalo era de 10 segundos.

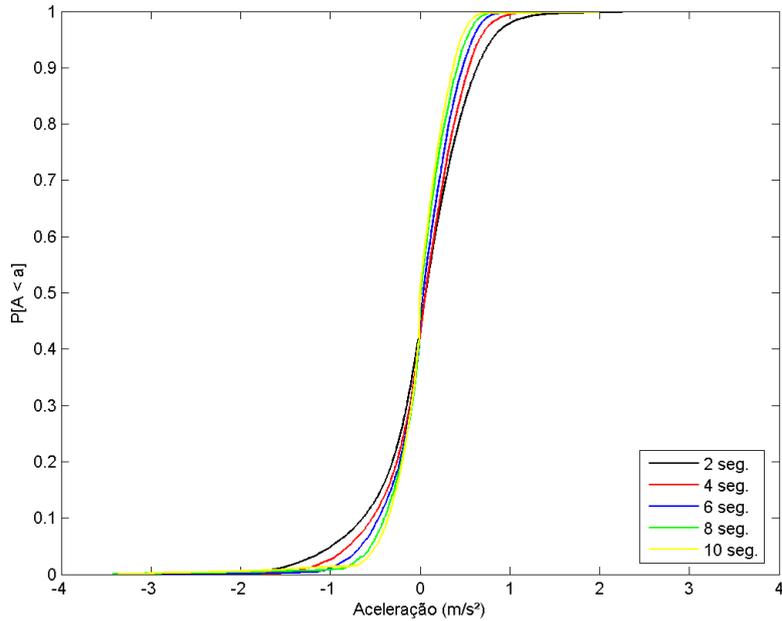


Figura 3.10: Funções de distribuição cumulativa empírica da aceleração sob diferentes intervalos de tempo de captura das posições.

Ao analisar as ECDFs desse componente (Figura 3.10), a medida que o intervalo de observação aumenta, vislumbra-se uma tendência de concentração dos valores de acelerações encontrados entre  $[-1m/s^2; 1m/s^2]$ . Assim, verificou-se que para a ECDF do intervalo de observação de 2 segundos, 93% das acelerações encontradas estavam entre  $[-1m/s^2; 1m/s^2]$ , enquanto que na ECDF do intervalo de observação de 10 segundos, 98% das acelerações estavam entre  $[-1m/s^2; 1m/s^2]$ .

### 3.6.3 Ângulo de Mudança de Direção

Analisando os resultados obtidos, pode-se perceber a ocorrência de diferenças significativas nos resultados encontrados para o componentes ângulo de mudança de direção, de acordo com o incremento do intervalo de observação. Dessa forma, verificamos um aumento no número de ângulos de maiores intensidades, impactando diretamente no cálculo da média final, que passou de  $7^\circ$  para aproximadamente  $20^\circ$ , quando o intervalo de observação passa de 2 segundos para 10 segundos respectivamente. Assim sendo, para a distribuição do intervalo de observação de 2 segundos,

91% dos ângulos de mudança de direção eram menores ou iguais a  $20^\circ$ . Já para a ECDF com o intervalo de 10 segundos, somente 65% dos ângulos encontrados eram menores ou iguais a  $20^\circ$ .

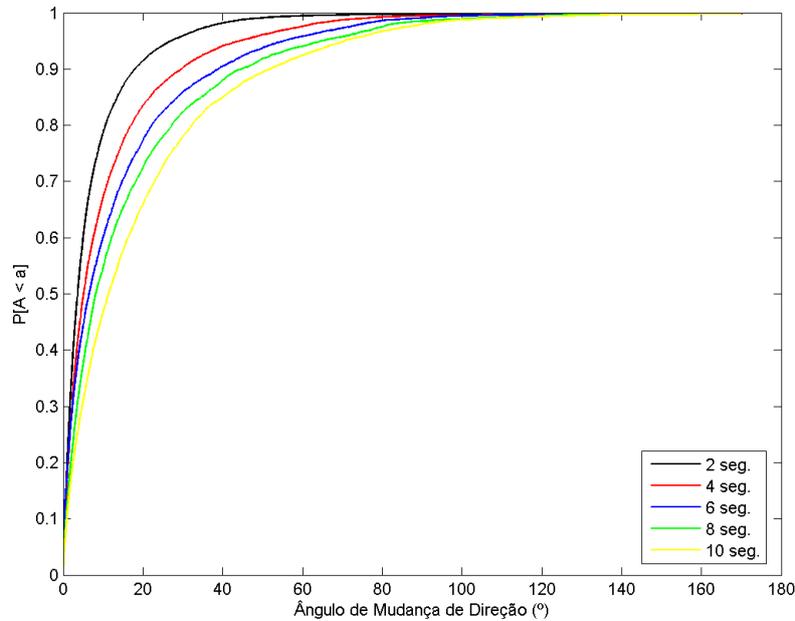


Figura 3.11: Funções de distribuição cumulativa empírica do ângulo de mudança de direção sob diferentes intervalos de tempo de captura das posições.

O aumento da intensidade dos ângulos se deve principalmente aos grandes deslocamentos ocorridos nos momentos em que as posições do dispositivo não foram capturadas, fazendo com que o resultado do cálculo do ângulo gerado pela mudança de direção aumentasse. Conseqüentemente, pode-se constatar também um aumento do valor máximo encontrado para o ângulo de mudança de direção a medida que o intervalo de observação é incrementado.

### 3.6.4 Tempo de Pausa

Assim como o componente ângulo de mudança de direção, a medida tempo de pausa também apresenta grandes diferenças nos resultados quando o intervalo de observação é variado. O valor máximo encontrado para o tempo de pausa, que era de 168 segundos quando o intervalo de observação era de 2 segundos, passou a ser

de 114 segundos para o intervalo de observação de 10 segundos. Também notou-se uma queda no valor da média, que passou de 7 segundos para 2 segundos, quando o intervalo de observação muda de 2 segundos para 10 segundos respectivamente.

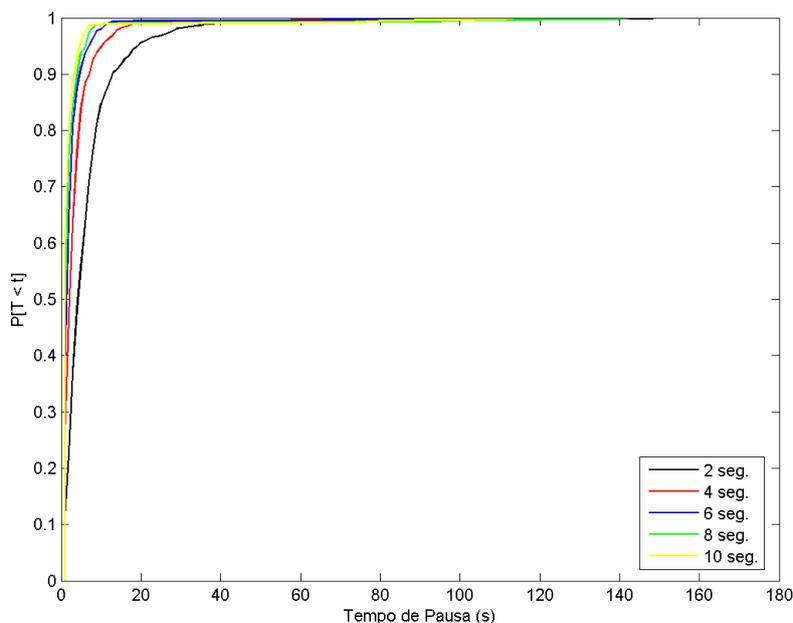


Figura 3.12: Funções de distribuição cumulativa empírica do tempo de pausa sob diferentes intervalos de tempo de captura das posições.

Percebeu-se, através da Figura 3.12, de acordo com os incrementos do intervalo de observação, a diminuição dos menores valores encontrados para a medida tempo de pausa. Pode-se concluir que a ocorrência desse fato se deve ao tamanho do intervalo de observação utilizado, que muitas das vezes vai ser maior do que os tempos de pausa encontrados durante os movimentos dos veículos. Verificou-se, então, que para a ECDF do intervalo de observação de 2 segundos, somente 55% dos tempos de pausa encontrados eram menores que 5 segundos, enquanto que para a ECDF do intervalo de observação de 10 segundos, 95% dos tempos de pausa encontrados eram menores que 5 segundos.

### 3.7 Considerações Finais

A realização de uma caracterização apurada da mobilidade veicular encontrada neste capítulo permitiu a obtenção de informações detalhadas sobre o comportamento dos movimentos veiculares investigados, bem como permitiu o fornecimento de dados estatísticos importantes que poderão ser utilizados para o desenvolvimento de modelos de mobilidade mais realistas.

Seguindo a metodologia utilizada neste trabalho para a caracterização da mobilidade, o cenário de observação definido foi a cidade de Muriaé, onde 25 ônibus circulam dentro de uma área de  $9Km \times 8Km$ . A fim de que a mobilidade investigada fosse real, um dispositivo GPS foi utilizado para a captura das posições dos ônibus durante seus movimentos. Durante o processamento desses dados, verificou-se que eles não precisavam passar pela etapa de filtragem, conseqüentemente não sendo preciso fazer a eliminação de nenhum desses dados, pois estes não apresentaram valores atípicos.

Durante a análise estatística dos dados, foram obtidos resultados de interesse para cada componente do movimento e estes foram mostrados na Tabela 3.2. A geração e visualização da função de distribuição empírica de cada componente do movimento também foi relevante para o estudo do comportamento de tais componentes durante os movimentos capturados. A partir dos resultados alcançados, pode-se afirmar que na maior parte do tempo os ônibus circulam em baixas velocidades com a média sendo de  $22Km/h$ , e que as velocidades predominantes dos ônibus durante seus percursos variaram entre  $10Km/h$  e  $35Km/h$ . A variação do ângulo de mudança de direção a cada instante de tempo capturado também foi pequena, por isso a média encontrada foi de  $7^\circ$ , o que significa que na maior parte do tempo os ônibus circulam em linhas retas.

Apesar de terem sido encontradas muitas acelerações e desacelerações de maiores intensidades, observou-se que as acelerações e desacelerações suaves predominam durante os movimentos dos ônibus. Como a coleta da mobilidade foi feita em uma cidade de porte médio, percebeu-se que não houve muita influência de engarrafa-

mentos para o cálculo do tempo de pausa. Dessa forma, pode-se afirmar também que na maioria das vezes os ônibus ficam sem se movimentar quando eles param para o embarque e desembarque de passageiros, e que tais paradas duram em média 7 segundos.

Verificou-se também que o intervalo de tempo utilizado para a captura das posições dos veículos influencia no comportamento dos componentes de seu movimento, e que quanto menor o intervalo, mais detalhes e informações precisas podem ser obtidos da mobilidade analisada. Dentro desse contexto, no restante deste trabalho foram utilizados os *traces* capturados com intervalo de tempo de captura das posições de 2 segundos, sendo empregados para descobrir qual a distribuição de probabilidade conhecida na literatura que mais se aproxima do comportamento dos componentes do movimento analisado. Posteriormente, no Capítulo 5, tais *traces* também serão utilizados na avaliação do desempenho de alguns protocolos de roteamento utilizados em uma rede veicular formada por ônibus.

## Capítulo 4

# Ajuste de Algumas Funções de Distribuição de Probabilidade em Relação aos Componentes do Movimento Capturado

**R**ECONHECER os padrões e as características comportamentais dos movimentos capturados pode ajudar os pesquisadores a compreender melhor a mobilidade veicular investigada. Assim, é importante identificar as funções de distribuição de probabilidade presentes na literatura que melhor se ajustem aos componentes da mobilidade. Tais distribuições poderiam ser usadas como base para a criação ou para a parametrização de modelos de mobilidade veiculares que pretendam representar o movimento de ônibus urbanos de uma cidade. Dessa forma, nesse capítulo será feito uma análise da aproximação dos componentes da mobilidade real capturada em relação a algumas das mais conhecidas funções de distribuição de probabilidade ajustadas aos dados reais. Após essa análise, poderemos descobrir, dentre as distribuições utilizadas, qual foi a que mais se aproximou de cada um dos componentes avaliados.

## 4.1 Visão Geral

Distribuições de probabilidade conhecidas na literatura, vêm sendo usadas por pesquisadores para a criação de modelos de mobilidade sintéticos na tentativa de tornar tais modelos mais realistas. A idéia é fazer com que os valores dos componentes da mobilidade (velocidade, aceleração, ângulo de mudança de direção e tempo de pausa) sejam obtidos de distribuições de probabilidade que mais se aproximem da mobilidade real, podendo esta ser de pedestres ou de veículos. No entanto, muitos trabalhos utilizam distribuições inadequadas para representar os componentes do movimento, fazendo, conseqüentemente, com que a mobilidade gerada tenha seu realismo comprometido, e tornando assim o modelo de mobilidade inapropriado para representar os movimentos reais.

A utilização de distribuições inadequadas para obter os valores dos componentes da mobilidade pode ser explicada pelo fato de muitas dessas distribuições usadas simplificarem a criação, a utilização e a implementação do modelo de mobilidade gerado. Um exemplo disso é o uso da distribuição uniforme na obtenção da velocidade e da direção nos modelos de mobilidade amplamente conhecidos *random waypoint*(RWP) [22, 23, 47, 24] e *random walk*(RW) [22, 48].

Muitos modelos de mobilidade veiculares também utilizam a distribuição uniforme para obter os valores de alguns componentes do movimento. Os valores da velocidade, por exemplo, podem ser obtidos através de uma distribuição uniformemente distribuída entre a velocidade mínima e a velocidade máxima permitida pela legislação de trânsito da rodovia em que o veículo estiver percorrendo [49, 50, 51, 52].

Porém, outros trabalhos, utilizam apropriadamente as distribuições de probabilidade encontradas a partir da análise de *traces* reais, para a criação de modelos de mobilidade mais realistas. Em [53], através da mobilidade dos usuários coletados a partir de alguns pontos de acesso no Dartmouth College<sup>1</sup>, os autores descobriram que a velocidade e o tempo de pausa da mobilidade daqueles usuários seguiam uma

---

<sup>1</sup>Universidade localizada na cidade de Hanover, estado de New Hampshire. Mais detalhes podem ser encontrados em <http://www.dartmouth.edu>

distribuição Lognormal. Tais informações auxiliaram posteriormente na criação de um modelo de mobilidade sintético cujos resultados se aproximaram da mobilidade real capturada.

Dentre os trabalhos pesquisados, não foi encontrado nenhum estudo que tenha realizado uma análise numérica da aproximação de funções de distribuição de probabilidade conhecidas em relação aos componentes da mobilidade veicular real. Dessa forma, o objetivo deste capítulo é descobrir qual, dentre as distribuições analisadas, é a que mais se aproxima de cada componente do movimento avaliado. Para isso, as funções de distribuição cumulativa empírica de cada componente da mobilidade real capturada (velocidade, aceleração, ângulo de mudança de direção e tempo de pausa), identificadas no Capítulo 3, foram comparadas a algumas das distribuições de probabilidade conhecidas na literatura ajustadas aos dados reais. Com os resultados dessa comparação, pretendemos identificar quais são as distribuições de probabilidade utilizadas que mais se aproximam das ECDF dos componentes da mobilidade real capturada. As distribuições utilizadas na comparação foram: Exponencial, Gamma, Lognormal, Normal e Weibull [54, 41, 55, 42, 40, 56].

A fim de realizar tal comparação, foi necessário ajustar os parâmetros de cada distribuição utilizada aos dados reais. Para isso, o estimador da máxima verossimilhança (Maximum Likelihood Estimation - MLE) [57, 56, 40] foi usado na escolha dos parâmetros de cada distribuição, fazendo com que elas se aproximassem dos dados reais.

Posteriormente, para verificar qual função utilizada mais se aproximou de cada um dos componentes do movimento capturado, cumpriu-se uma análise numérica através da utilização de dois métodos de estimação de valores: (i) - Erro Quadrático Médio (Mean Square Error - MSE) e (ii) - Teste de Kolmogorov-Smirnov (Kolmogorov-Smirnov - K-S). Detalhes sobre estes métodos podem ser encontrados em [57, 56]. Os resultados obtidos pela análise numérica podem ser vistos na Tabela 4.1.

Para entender e avaliar o grau de aproximação das funções de distribuição de probabilidade aos dados reais de cada componente investigado, nas seções seguintes

Tabela 4.1: MSE e K-S entre os componentes da mobilidade veicular e algumas funções de distribuição de probabilidade.

	<b>Componente</b>	<b>Normal</b>	<b>Lognormal</b>	<b>Exponencial</b>	<b>Weibull</b>	<b>Gama</b>
<b>MSE</b>	Velocidade	0,000867	0,003039	0,019523	0,000368	0,000932
	Aceleração	0,001541				
	Ângulo	0,019226	0,009929	0,005326	0,000765	0,001107
	Tempo de Pausa	0,015786	0,00062	0,002143	0,002211	0,002409
<b>Teste K-S</b>	Velocidade	0,048632	0,096545	0,224002	0,031452	0,056368
	Aceleração	0,076356				
	Ângulo	0,256627	0,156704	0,107617	0,054373	0,062117
	Tempo de Pausa	0,288073	0,083126	0,128678	0,122418	0,107324

será mostrado visualmente uma comparação do comportamento de cada componente através da ECDF, com as distribuições de probabilidade utilizadas e ajustadas aos respectivos dados reais. Os resultados e conclusões obtidos para cada componente também serão comentados na sequência.

## 4.2 Velocidade

Através da Figura 4.1, pode-se comparar visualmente a ECDF do componente velocidade da mobilidade veicular capturada em relação às ECDF das funções Exponencial, Gama, Lognormal, Normal e Weibull; sendo que tais funções foram ajustadas ao componente velocidade pelo método MLE. Além da análise visual, foi necessário a realização de uma análise numérica para podermos identificar, de maneira mais formal, qual a função de distribuição que mais se aproximou da curva da velocidade. Assim, através dos métodos MSE e K-S, foi computado o erro médio entre as curvas das ECDF das distribuições de probabilidade utilizadas e a ECDF do componente velocidade da mobilidade capturada.

Conforme indicado na Tabela 4.1, conclui-se que a distribuição Weibull foi a que mais se aproximou do componente velocidade, pois apresentou os menores valores para o MSE e K-S. Portanto, a partir dos resultados obtidos, pode-se dizer que a velocidade do movimento veicular, atribuída aos ônibus públicos urbanos da cidade de Muriaé, segue uma função de distribuição Weibull.

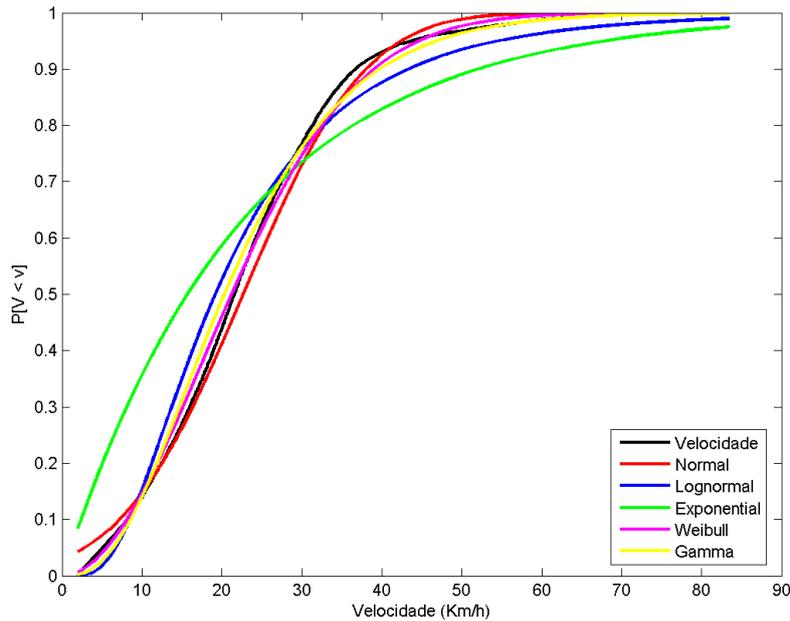


Figura 4.1: Função de distribuição cumulativa empírica da velocidade e uma comparação com as funções de distribuição cumulativa Exponencial, Gamma, Lognormal, Normal e Weibull.

### 4.3 Aceleração

A Figura 4.2 compara a ECDF do componente aceleração somente com a distribuição Normal, pois a Normal foi a única distribuição que assumiu valores negativos semelhantemente aos dados reais. Assim, através da análise visual e da observação dos pequenos valores obtidos para MSE e K-S desta distribuição em relação a curva da aceleração, pode-se verificar a aproximação deste componente com a distribuição Normal.

### 4.4 Ângulo de Mudança de Direção

A ECDF do componente ângulo de mudança de direção também foi comparada às funções de distribuição de probabilidade utilizadas e ajustadas aos dados reais. Assim, através da Figura 4.3, pode ser feita uma análise visual da aproximação dessas funções. Percebe-se que as distribuições Gamma e Weibull se aproximaram bastante

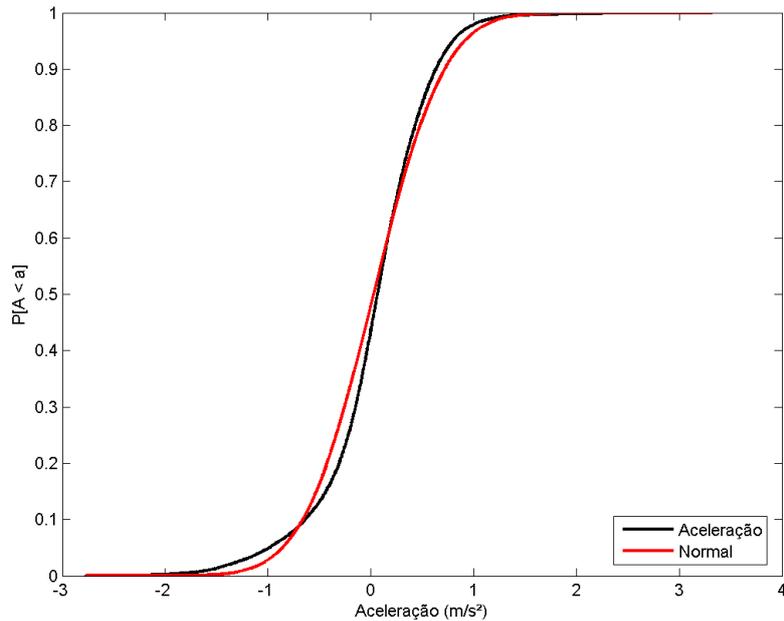


Figura 4.2: Função de distribuição cumulativa empírica da aceleração e uma comparação com as funções de distribuição cumulativa Normal.

da curva desse componente. E, após verificar a Tabela 4.1, é possível afirmar que a distribuição Weibull foi a que teve a melhor aproximação da curva do ângulo de mudança de direção, visto que ela apresentou o menor valor para MSE e K-S, com 0.000765 e 0.054373 respectivamente. Portanto, a partir dos resultados obtidos, pode-se dizer que, assim como a velocidade do movimento veicular, o componente ângulo de mudança de direção também segue uma função de distribuição Weibull.

## 4.5 Tempo de Pausa

A Figura 4.4 mostra a curva da ECDF da medida tempo de pausa da mobilidade veicular capturada e as ECDF das distribuições Exponencial, Gamma, Lognormal, Normal e Weibull ajustadas através do método MLE à curva do tempo de pausa. Observa-se na Tabela 4.1, que o menor MSE e K-S foi da distribuição Lognormal, com os valores de 0.00062 e 0.083126 respectivamente. Portanto, pode-se dizer que a medida tempo de pausa da mobilidade analisada seguiu a distribuição Lognormal.

Concluindo: após uma verificação numérica da aproximação das distribuições

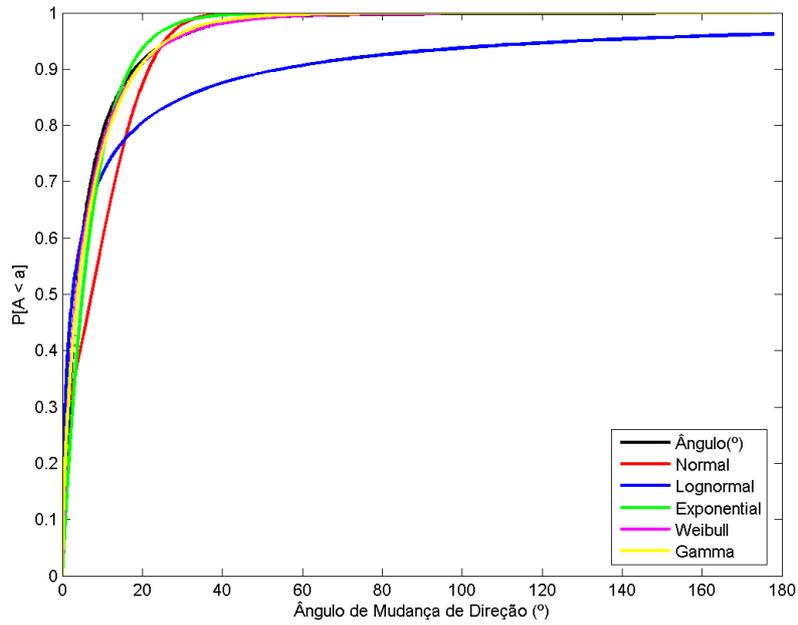


Figura 4.3: Função de distribuição cumulativa empírica do ângulo de mudança de direção e uma comparação com as funções de distribuição cumulativa Exponencial, Gamma, Lognormal, Normal e Weibull.

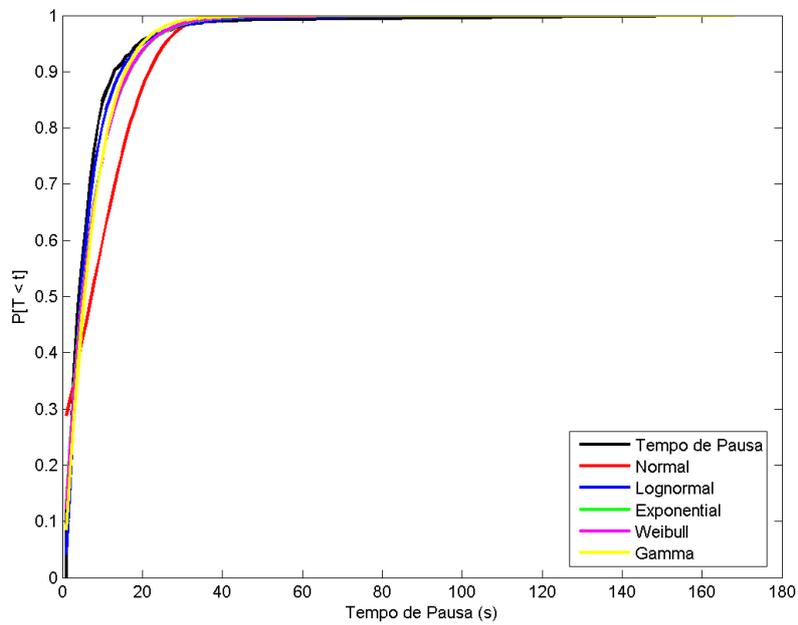


Figura 4.4: Função de distribuição cumulativa empírica do tempo de pausa e uma comparação com as funções de distribuição cumulativa Exponencial, Gamma, Lognormal, Normal e Weibull.

(Exponencial, Gamma, Lognormal, Normal e Weibull) com os componentes da mobilidade avaliados, podemos afirmar que os componentes velocidade e ângulo de mudança de direção se ajustam melhor a distribuição Weibull. Já o componente aceleração se aproxima bem da distribuição Normal, enquanto que a medida tempo de pausa segue a distribuição Lognormal.

Os resultados apresentados neste capítulo poderão servir para criar ou para auxiliar na configuração dos parâmetros de modelos de mobilidade que pretendam representar os ônibus públicos urbanos de uma cidade de porte médio. Além disso, vale ressaltar que esses resultados são específicos para o cenário investigado, não podendo ser generalizados para representarem a mobilidade veicular em quaisquer cenários.

## Capítulo 5

# Impacto da Mobilidade Veicular Capturada no Desempenho dos Protocolos de Roteamento das Redes Veiculares Tolerantes a Atrasos e Desconexões

**A** MANEIRA como os pacotes trafegam por uma rede determina, dentre outras características, a qualidade da rede. Informações como o número de pacotes perdidos e recebidos, o tempo de transmissão de um pacote e o atraso para o recebimento do mesmo, estão diretamente relacionadas com o tráfego de pacotes na rede. Os protocolos de roteamento são utilizados para organizar este tráfego de pacotes e, portanto, a análise do desempenho desses protocolos é um resultado importante no estudo de redes em geral e, particularmente nas DTNs veiculares, que possuem um alto grau de desconectividade. Dessa forma, neste Capítulo será utilizada a mobilidade real para avaliar o desempenho dos protocolos de roteamento implementados nas DTNs Veiculares.

## 5.1 Visão Geral

Em uma DTN veicular, na qual os pacotes são roteados pela rede através de veículos conectados intermitentemente, vários obstáculos dificultam o roteamento dos pacotes, entre eles: tempo limitado de contato entre os veículos e frequentes mudanças na topologia da rede. Assim, para que os protocolos de roteamento obtenham um desempenho satisfatório, é preciso que eles sejam capazes de superar os problemas impostos por esse tipo de rede.

Os protocolos de roteamento existentes em uma DTN podem ser classificados em dois grupos: encaminhadores ou replicadores. Os encaminhadores escolhem quais pacotes serão transmitidos, tentando dessa forma economizar seus recursos. O modelo mais econômico é o conhecido como transmissão direta, onde a entrega só pode ser feita pelo contato direto do nó origem com o nó destino. Geralmente, os roteamentos baseados em encaminhamentos fazem uso de informações ou estimativas que os nós obtêm sobre a rede, por exemplo, tempo médio de contato ou frequência dos contatos. Dessa forma, o nó é capaz de decidir para qual nó encaminhar um pacote e o melhor instante de fazê-lo. Exemplos de roteamento encaminhadores são: o PROPHET [58], o MEED [59] e o MAXPROP [36].

Os roteamentos baseados em replicação de pacotes tentam aproveitar as oportunidades de contato para transmitir o máximo de pacotes possíveis entre os nós. O objetivo deste tipo de roteamento é aumentar a probabilidade de uma cópia do pacote alcançar o nó destino, tentando assim reduzir o atraso na entrega. Entretanto, o aumento do número de réplicas dos pacotes na rede pode resultar em um rápido preenchimento do *buffer*, fazendo com que alguns pacotes sejam descartados, podendo ter uma queda no desempenho da rede. Dentre os roteamentos replicadores, podemos citar o Epidêmico [34], Rapid [60], o *Spray and Wait* [61] e o *Spray and Focus* [62].

Muitos dos protocolos de roteamento para DTN conhecidos na literatura podem ser utilizados para avaliar uma rede veicular [18]. Dessa forma, os protocolos utilizados neste trabalho serão: o Epidêmico, o PROPHET, o *Spray and Wait* e o

MaxProp. A descrição do funcionamento destes protocolos será feito na sequência.

## 5.2 Protocolos de Roteamento Avaliados

### 5.2.1 Epidêmico

O roteamento Epidêmico, definido em [34], tem como principal objetivo maximizar a taxa de entrega dos pacotes aos nós destinos, com suposições mínimas relativas ao conhecimento da topologia e da conectividade da rede. O roteamento baseia-se na teoria dos algoritmos epidêmicos [63, 64], fazendo com que dois nós repassem seus respectivos pacotes, sempre que eles estiverem em contato um com o outro.

Este protocolo funciona da seguinte maneira: quando um nó entra no alcance de transmissão de outro nó e é estabelecida uma conexão, eles trocam uma lista contendo seus pacotes armazenados e, em seguida, fazem uma comparação dos pacotes contidos na lista recebida com os pacotes presentes em cada nó, para determinar quais pacotes o nó não possui. Feito isso, o nó solicita o envio de cópias destes pacotes. Quanto mais cópias de um mesmo pacote forem encaminhadas na rede, maior será a probabilidade deste pacote ser entregue e menor será o atraso.

Neste protocolo, os maiores problemas são atribuídos ao alto custo em termos do número de transmissões de cópias do pacote e o espaço ocupado nos *buffers* dos nós. Dessa forma, a taxa de entrega dos pacotes e o tempo de atraso para a entrega estão diretamente ligados ao tamanho do *buffer* dos nós da rede, já que o *buffer* pode ser limitado ocasionando a perda de pacotes repassados na rede. Portanto, quando muitos pacotes são gerados e replicados na rede, pode ocorrer de um dado nó não ter espaço suficiente em seu *buffer* para a entrada de novos pacotes, obrigando assim que o nó descarte alguns pacotes armazenados para a entrada dos novos. Conseqüentemente, com um maior número de pacotes descartados, isso poderia baixar a taxa de entrega dos pacotes na rede e, ocasionalmente, aumentar o tempo de atraso na entrega dos mesmos.

Quando for necessário que um nó descarte um pacote, é preciso que se adote uma

estratégia que priorize a eliminação dos pacotes menos relevantes, tentando evitar assim uma queda na taxa de entrega deles. Em geral, a estratégia adotada pelos nós é o descarte dos pacotes mais antigos em favor dos mais novos, tal estratégia é simples e mais fácil de se implementar. No entanto, esta estratégia pode ser alterada de acordo com o pesquisador durante a implementação deste protocolo. No presente trabalho, foi adotado a estratégia mencionada anteriormente, a qual através da política *First-In-First-Out* (FIFO), determinou-se que quando o *buffer* estiver cheio e tiver um novo pacote para entrar, o pacote a ser descartado será o primeiro pacote que entrou no *buffer*, ou seja, o mais antigo.

### 5.2.2 PROPHET

O protocolo de roteamento *Probabilistic ROuting Protocol using History of Encounters and Transitivity* (PROPHET)[58] utiliza a propriedade de que os nós não se movem aleatoriamente, mais sim de maneira previsível. Dessa forma, supõe-se que os movimentos de um dado nó podem ser previsíveis, baseando-se na repetição dos padrões comportamentais da mobilidade deste nó. Portanto, o roteamento deste protocolo utiliza algumas observações para melhorar seu desempenho, presumindo-se que se um nó visitou um local diversas vezes, é provável que ele visite este local novamente.

Este protocolo utiliza uma métrica chamada de previsibilidade de entrega ( $P_{(a,b)} \in [0, 1]$ ), que corresponde à probabilidade de um dado nó  $a$  entregar os pacotes para um outro dado nó destino  $b$ . Semelhantemente ao Epidêmico, quando um nó entra em contato com um outro nó, eles trocam suas listas de pacotes. Porém no PROPHET, essa lista também contém, para cada pacote, o parâmetro previsibilidade de entrega, indicando a probabilidade daquele nó entregar o pacote para o seu respectivo nó destino.

O valor de  $P_{(a,b)}$  aumenta sempre que  $a$  e  $b$  se encontram, e diminui se  $a$  e  $b$  deixam de se encontrar frequentemente. O tempo é controlado por uma constante  $k$ , denominada constante de envelhecimento, que corresponde ao número de unidades

de tempo transcorridas desde a última vez que a métrica foi atualizada.

Quando um nó recebe a lista de pacotes do nó vizinho, ele calcula a probabilidade de entrega para cada pacote que ainda não possui. Em seguida, para cada pacote, o nó compara a probabilidade indicada na sua lista com a probabilidade indicada na lista recebida do vizinho. Essa comparação é realizada para verificar qual dos dois nós possui a maior probabilidade de entrega. Feito isso, o processo da troca de pacotes entre os nós é descrito a seguir. Primeiramente, o nó deve enviar um pedido dos pacotes não armazenadas que possuem uma maior probabilidade de serem entregues através dele. Em seguida, o nó recebe o pedido dos pacotes do vizinho e os envia. Posteriormente, o nó apaga do *buffer* todas os pacotes que o vizinho tem maior probabilidade de entregar. No final, cada nó guarda somente os pacotes cujo destino é mais provável de ser alcançado por ele.

Os resultados das simulações demonstram que o PROPHET apresenta um bom desempenho em redes com alta mobilidade ou que possuem nós com grandes alcances de comunicação, já que estes fatores permitem um maior número de encontros de nós, o que conseqüentemente permite que mais informações sobre a rede sejam trocadas.

### 5.2.3 Spray and Wait

O objetivo deste roteamento é gerar um pequeno número de cópias dos pacotes gerados, a fim de assegurar que o número de transmissões seja pequeno e controlado. Uma família de protocolos de múltiplas cópias, chamada de *Spray*, pode ser vista em [65]. O protocolo *Spray and Wait* (SW) [65], integrante desta família, desenvolvido com o intuito de limitar a quantidade de cópias de um mesmo pacote na rede, combina a velocidade do roteamento Epidêmico com a simplicidade de um envio direto para o nó destino.

O funcionamento desse roteamento depende principalmente da determinação de um parâmetro  $L$ , que representa o número máximo de nós distintos a receberem a cópia de um determinado pacote. O cálculo do melhor valor de  $L$  depende de valores como o número de nós da rede e o tempo esperado de uma transmissão direta ao

destinatário.

O roteamento deste protocolo é feito em duas fases. Na primeira, chamada de *Spray*, para cada pacote gerado no nó origem, são feitas  $L$  cópias deste pacote nos quais serão repassados individualmente para os próximos  $L - 1$  nós encontrados. Se o nó destino não foi alcançado nesta fase, o protocolo entra na fase de espera, chamada *Wait*, onde os  $L$  nós que contêm cópias do pacote, irão repassá-los somente para o nó destino. Caso não haja espaço em *buffer* para armazenar o pacote, é utilizada a estratégia FIFO.

Uma otimização deste protocolo bastante utilizada é chamada de *Binary Spray and Wait*, na qual cada nó caso possua  $n > 1$  cópias do pacote (onde  $n$  é o número de cópias de um pacote contido em um nó), irá repassar  $\lceil n/2 \rceil$  e manterá  $\lfloor n/2 \rfloor$  cópias do pacote consigo, até o nó possuir apenas uma cópia do pacote ( $n = 1$ ), quando entrará na fase *Wait*.

## 5.2.4 MaxProp

O protocolo de roteamento MaxProp, muito utilizado para roteamento em redes veiculares, também foi avaliado neste trabalho. Esse roteamento foi inicialmente implementado em um rede veicular denominada UMassDieselNet, na cidade de Amherst, estado de Massachusetts (EUA). A rede era composta de 30 ônibus equipados com rádios IEEE 802.11b e computadores com capacidade de estabelecer comunicação uns com os outros [36].

O roteamento deste protocolo funciona da seguinte maneira. Assume-se que cada nó possui *buffer* ilimitado para os pacotes gerados por ele, e um *buffer* finito para os pacotes gerados por outros nós. Assume-se também que as transferências oportunísticas são limitadas, tanto na duração quanto na largura de banda. Através deste protocolo, um nó da rede repassa os pacotes para os outros nós até que o destino seja alcançado, até que o temporizador do pacote expire ou até que uma confirmação de entrega seja encaminhada por um terceiro nó.

O MaxProp utiliza mecanismos para gerenciar a ordem com a qual os pacotes

serão apagados ou serão transmitidos. Cada nó mantém uma lista com as probabilidades de entrega para os outros nós da rede, e a cada pacote armazenado por cada nó, é atribuído um custo que é uma estimativa de sua probabilidade de entrega. Aqueles que foram criados mais recentemente tem prioridade maior.

Cada nó possui uma lista ordenada com os custos de cada pacote a ser entregue até o seu destino. O MaxProp, então, define através destes custos a ordem através da qual os pacotes serão transmitidos e apagados. Pacotes com maior prioridade são os primeiros a serem transmitidas durante uma transferência oportunística. Pacotes com as menores prioridades são os primeiros a serem excluídos. Quando dois pacotes possuem destinos com a mesma prioridade, ganha precedência aquele pacote que chega a seu destino com o menor número de saltos.

É atribuída probabilidade aos encontros dos nós, e essa probabilidade é calculada com base na frequência de encontro entre eles. Logo, um pacote terá mais chances de ser entregue por um nó que tenha encontrado o nó destino mais vezes. Essa probabilidade é calculada da seguinte forma: seja um conjunto de nós na rede identificado por  $s$ , cada nó  $i \in s$  possui uma probabilidade  $f_j^i$  de encontrar um nó  $j \in s$ . Para todos os nós,  $f_j^i$  é inicializado com o valor  $1/(|s| - 1)$ . Quando um nó  $j$  é encontrado,  $f_j^i$  é incrementado por 1, e todos os outros valores de  $f$  são renormalizados; e quando dois nós se encontram, eles trocam seus valores de  $f$ . Um nó pode calcular o custo  $c(i, i + 1, \dots, d)$  de cada caminho possível para o destino  $d$ , até  $n$  saltos. O cálculo do custo é definido pela equação a seguir:

$$c(i, i + 1, \dots, d) = \sum_{x=i}^{d-1} [1 - (f_{x+1}^x)] \quad (5.1)$$

Para ilustrar a situação, veja o exemplo a seguir: Seja uma rede com 4 nós, A, B, C e D. Imagine que eles estejam se movendo e que já possuam a probabilidade de encontro de cada nó da rede calculada por eles. O nó então gera um pacote cujo o destino é o nó D. Assim, dado a probabilidade de cada nó encontrar outro nó na rede, indicado nas tabelas da Figura 5.1, é exemplificado o cálculo do custo do nó A até D, determinado pelo menor valor, no caso 1.25. Desse modo, quando o nó A

encontrar os nós B e C, ele verifica que o nó B possui maiores chances de encontrar o nó D e então encaminha o pacote até este nó.

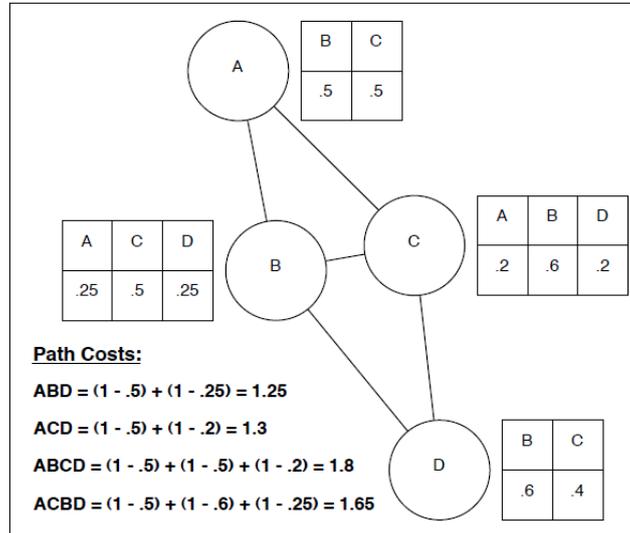


Figura 5.1: Cálculo do custo dos caminhos no MaxProp

### 5.3 Métricas Utilizadas

Os resultados obtidos através da realização das simulações são apresentados através de métricas de desempenho, que possibilitam a formulação das conclusões sobre o comportamento dos protocolos de roteamento avaliados. Dependendo da métrica utilizada, as características do protocolo podem mudar substancialmente.

Neste trabalho, para a avaliação dos protocolos vistos na Seção 5.2, utilizou-se duas métricas de avaliação de desempenho: probabilidade de entrega e atraso médio. A descrição dessas métricas será vista a seguir.

**Probabilidade de Entrega:** É definida pelo cálculo da taxa de entrega  $Te$ , sendo a razão entre os pacotes entregues ao nó destino e o total de pacotes gerados na rede. Geralmente esta taxa é vista em porcentagem, ou seja, é informado quantos por cento dos pacotes gerados chegaram ao seu destino. Seja  $n$  o número total de pacotes criados na rede durante uma simulação, e seja  $x$  a quantidade de pacotes que foram entregues ao nó que corresponde ao seu destino final. O cálculo da taxa

de entrega então é feito pela seguinte fórmula:

$$Te = \frac{x}{n} \quad (5.2)$$

**Atraso Médio:** Essa métrica é calculada pela razão entre a soma dos atrasos de todos os pacotes trafegados na rede sobre a quantidade desses pacotes, em que atraso é definido como a diferença entre o momento no qual o pacote foi criado e o momento de entrega ao destino. Seja  $x$  o número de pacotes entregues na rede ao nó destino; dado que tais pacotes foram entregues, seja  $a_1, a_2, a_3, \dots, a_n$  o tempo para a entrega de cada um desses  $x$  pacotes. O Atraso Médio  $Am$  pode então ser calculado da seguinte forma:

$$Am = \frac{\sum_{n=1}^x a_n}{x} \quad (5.3)$$

## 5.4 Descrição dos Experimentos

A mobilidade capturada pelo pesquisador foi utilizada para simular uma rede veicular cujo objetivo é avaliar o desempenho dos protocolos de roteamento utilizados.

Os experimentos foram realizados da seguinte maneira: de posse dos registros de todos os movimentos feitos pelos ônibus, estes registros foram formatados e sincronizados de acordo com os horários e os locais de partida de cada ônibus, gerando assim a mobilidade desses veículos durante todo um dia. A ferramenta MATLAB foi utilizada para a manipulação desses registros. Dessa forma, foram gerados para cada um dos 25 ônibus que circulam diariamente na cidade, um *trace* que corresponde a seus movimentos feitos durante 24 horas.

Os *traces* gerados foram então empregados como dados de entrada na configuração do simulador *Opportunistic Network Environment* (ONE) [66], fazendo com que essa rede se comporte como uma rede veicular cujos nós móveis são os ônibus urbanos do tipo coletivo de uma cidade de porte médio. Em seguida, foi feita uma

simulação de 380 minutos, sendo que os 50 primeiros minutos foram excluídos da simulação com o objetivo de eliminar a fase transiente da simulação. A Figura 5.2 apresenta um *snapshot* da tela de interface deste simulador utilizando os registros da movimentação real como parâmetro de entrada.

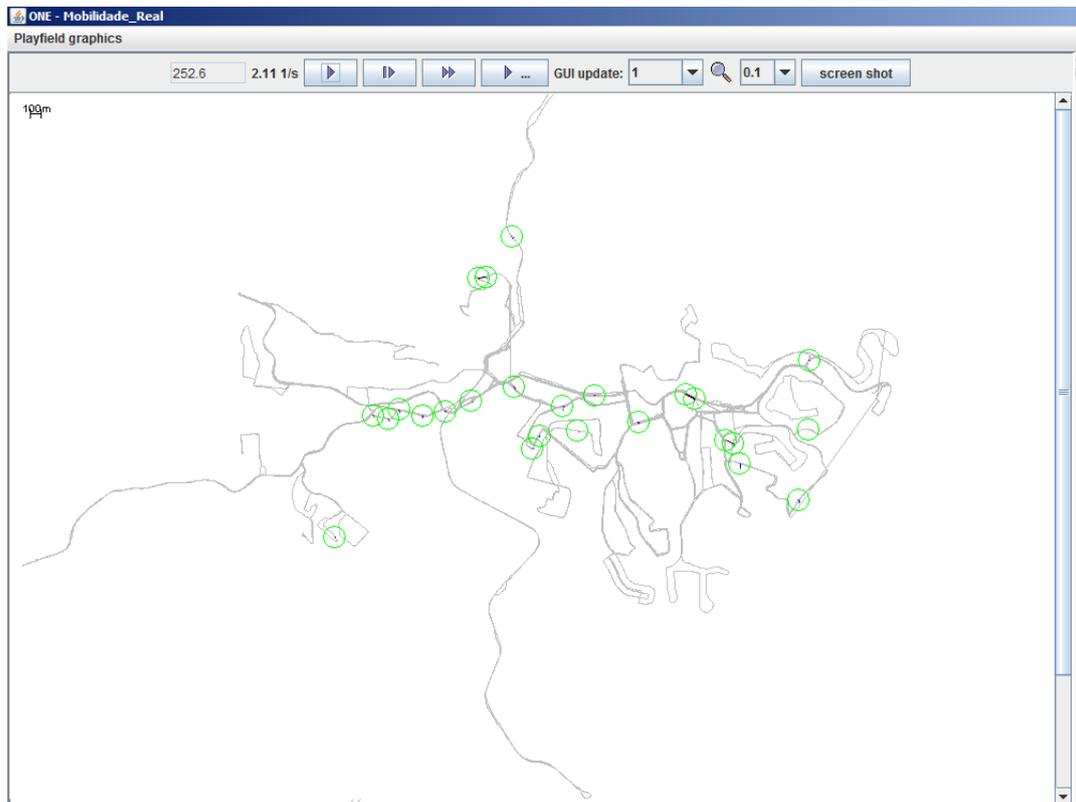


Figura 5.2: *Snapshot* da tela de interface do simulador ONE baseado na mobilidade veicular capturada

Os parâmetros usados na simulação são listados na Tabela 5.1, sendo que alguns desses parâmetros foram baseados em simulações já realizadas em redes veiculares, como em [36] e [67]. A área de simulação foi de 9Km X 8Km, sendo justamente a área pela qual os ônibus percorrem diariamente. Na simulação, cada nó gerava cerca de 18 pacotes por hora, e cada pacote gerado possuía um tamanho fixo que era escolhido aleatoriamente dentre uma distribuição uniforme de 1KB a 10KB. Por fim, foi definido que cada nó possuía uma velocidade de transmissão de 11Mbps, um raio fixo de 100 metros e um *buffer* limitado de 5MB.

Além dos parâmetros especificados, alguns dos protocolos de roteamento tiveram seus parâmetros característicos ajustados. Para PROPHET, foi ajustado para 0,75

Tabela 5.1: Parâmetros utilizados na simulação da rede veicular avaliada

Área de Simulação	9 Km x 8 Km
Tempo de Simulação	22800 segundos
Número de nós	25
Eliminação do tempo transiente	3000 segundos
Buffer em cada nó	5 MB
Velocidade transmissão do nó	11 Mbps
Raio de transmissão do nó	100 metros
Carga na rede por nó	18 pacotes gerados por hora
Tamanho dos pacotes	entre 1 KB e 20 KB

a probabilidade *a priori* de um nó entregar um pacote para o destino; a constante de envelhecimento também foi fixada em 30 segundos. Para o SW, a otimização binária foi utilizada, pois é um protocolo SW ótimo, e o número de cópias de cada pacote foi definido em 6. Estes valores foram definidos de maneira a obter menos pacotes repassados pela rede, com o intuito de maximizar a probabilidade de entrega. Finalmente, foram realizadas 10 rodadas de simulação para cada cenário investigado, e os resultados obtidos foram apresentados com um nível de confiança de 95%.

## 5.5 Resultados

As simulações realizadas possuem o intuito de determinar as ocorrências das transferências oportunísticas e a influência dos parâmetros dos nós sobre os protocolos avaliados. Assim, elas se procederam em dois conjuntos de experimentos, a partir dos quais foram gerados resultados fundamentados para entender o comportamento dos roteamentos utilizados. Os cenários observados seguem abaixo:

- i. Variando o raio de transmissão dos nós: neste cenário são gerados resultados para as métricas probabilidade de entrega, e atraso médio para a entrega quando o raio de transmissão é variado de 50 à 400 metros em cada nó. O restante dos parâmetros configurados são mostrados na Tabela 5.1.
- ii. Variando o tamanho do *buffer* dos nós: foi calculado a probabilidade de entrega e atraso médio, para quando o tamanho do *buffer* é variado de 512KB a 5MB

em cada nó. Os outros parâmetros configurados também são descritos na Tabela 5.1.

### 5.5.1 Probabilidade de Entrega

À medida que o raio de transmissão dos nós aumenta, cresce também o tráfego de pacotes na rede e, conseqüentemente, a perda desses pacotes devido ao transbordo de *buffer*. Em cada simulação realizada, foram gerados pelos nós um total de 2.475 pacotes na rede. Como cada pacote possui em média 10KB, pode ter ocorrido o transbordo do *buffer* de alguns nós da rede, configurados em 5MB, para os protocolos avaliados.

Ao observar a Figura 5.3, referente a probabilidade de entrega dos pacotes ao variar o raio de transmissão dos nós, percebe-se um melhor desempenho dos protocolos MaxProp e SW. Isso ocorre porque SW limita o número de cópias dos pacotes gerados, evitando assim um transbordo de *buffer*. Já o MaxProp encaminha apropriadamente os seus pacotes, além de eliminar do *buffer* os pacotes dos quais foram confirmados a sua entrega, evitando também conseqüentemente a perda de muitos pacotes por transbordo de *buffer*.

Verifica-se também que conforme o raio de transmissão é incrementado, os protocolos PROPHET e Epidêmico diminuem suas taxas de entrega. No PROPHET, os pacotes são perdidos por não terem cópias do mesmo na rede, e no Epidêmico, por haver muitas cópias de pacotes na rede e, conseqüentemente, rápidos transbordo de *buffers*.

Ao variar o *buffer* em cada nó, segundo é mostrado na Figura 5.4, observa-se novamente um melhor desempenho do MaxProp, e em seguida do SW para a taxa de entrega dos pacotes. Limites de cópias para os pacotes, impostos por esses protocolos, influenciaram diretamente na probabilidade do pacote ser entregue ao destino. Além disso, já que não houve alteração no tamanho dos pacotes, quanto menor o *buffer* dos nós, maior são as chances de ocorrer perda dos pacotes por transbordo de *buffers*.

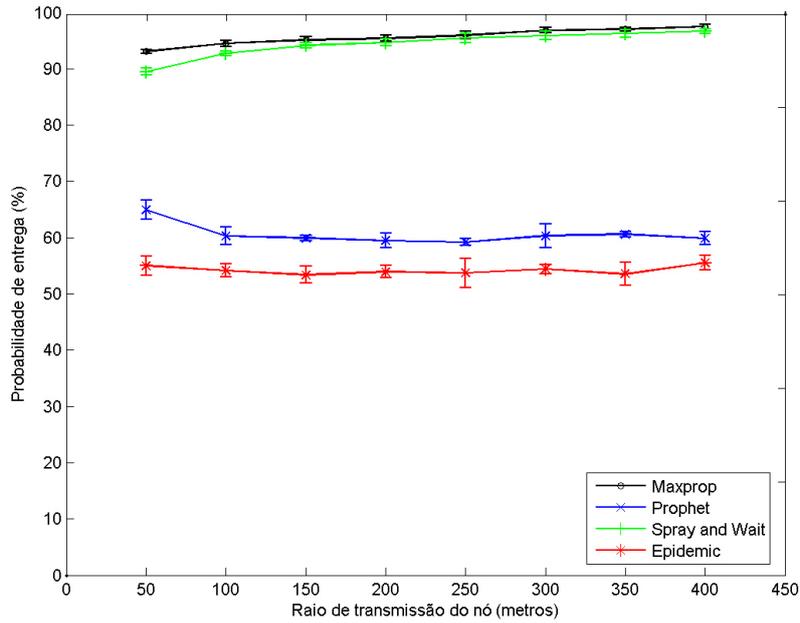


Figura 5.3: Probabilidade de entrega dos protocolos de roteamento variando o raio de transmissão dos nós.

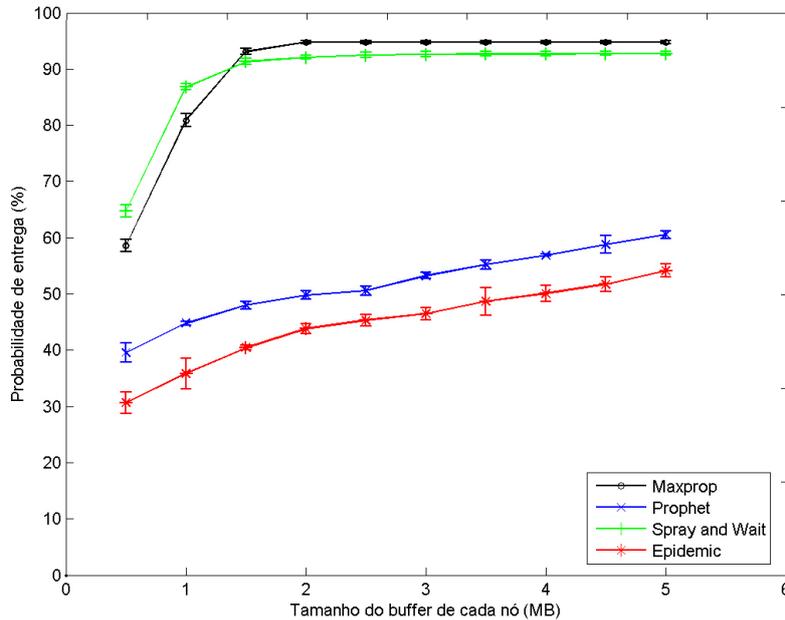


Figura 5.4: Probabilidade de entrega dos protocolos de roteamento variando o tamanho do *buffer* dos nós.

À medida que o *buffer* dos nós aumenta, observa-se uma melhora gradual no desempenho dos protocolos Epidêmico e PROPHET. Isso ocorre em virtude do menor número de pacotes que são perdidos na rede, e, conseqüentemente, são melhores as

chances deles serem entregues ao destino.

### 5.5.2 Atraso Médio

Na avaliação do atraso médio variando o raio de transmissão dos nós, conforme mostrado na Figura 5.5, verificou-se um melhor desempenho do protocolo MaxProp; resultado de sua produtiva ordenação na transmissão dos pacotes em um nó e do seu mecanismo eficiente de listagem e encaminhamento dos pacotes para os nós que possuem a maior probabilidade de entregá-lo ao destino.

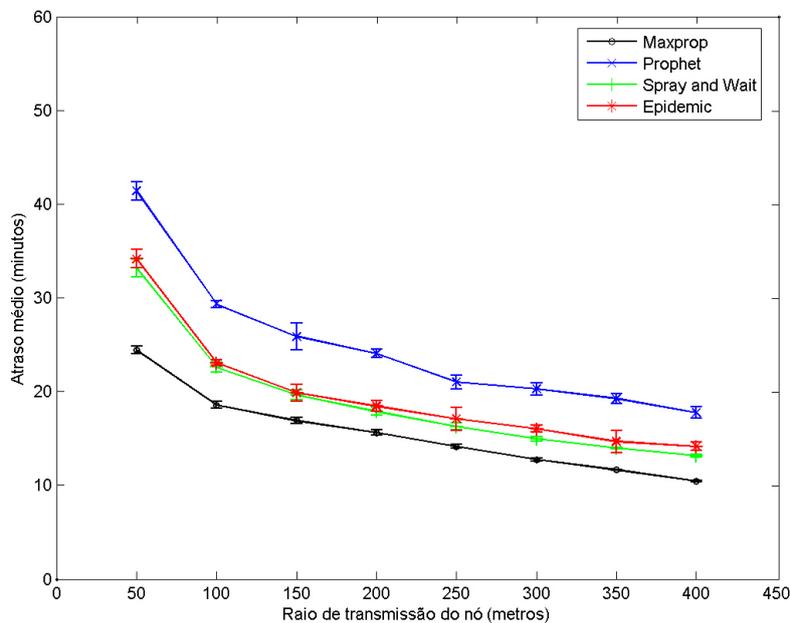


Figura 5.5: Atraso médio dos protocolos de roteamento variando o raio de transmissão dos nós.

Ao variar o raio, observou-se também que o SW e o Epidêmico obtiveram um desempenho satisfatório e muito próximos; já o PROPHET foi o protocolo que obteve o maior atraso na entrega dos pacotes, resultado atribuído ao fato deste protocolo não gerar cópias dos pacotes na rede, fazendo com que os pacotes não sejam perdidos, mas em compensação, demorem mais para chegar aos seus destinos.

Quando o tamanho do *buffer* é variado, o MaxProp obtém novamente o melhor desempenho na métrica atraso médio, Figura 5.6; resultado dos mecanismos que o caracterizam, fazendo com que menos pacotes sejam perdidos e que estes sejam

encaminhados apropriadamente ao seus destinos. O PROPHET obtém novamente o maior atraso médio para a entrega dos pacotes, caracterizando-o como um protocolo ineficiente em relação a velocidade com que os pacotes serão entregues ao nó destino.

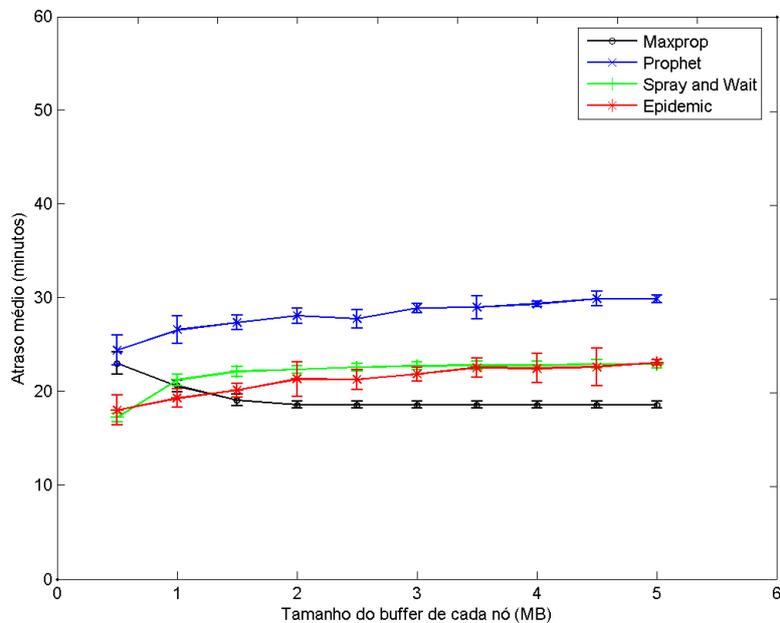


Figura 5.6: Atraso médio dos protocolos de roteamento variando o tamanho do *buffer* dos nós.

Ao fim deste capítulo, diante dos protocolos avaliados, podemos concluir que para uma DTN veicular, o roteamento mais apropriado de utilizar seria o MaxProp, visto que este apresentou os melhores resultados. Contudo, só podemos fazer esta afirmação para um tipo de cenário, caracterizado pelo movimento de ônibus urbanos do tipo coletivo em uma cidade de porte médio, visto que outros cenários não foram avaliados.

## Capítulo 6

# Uma Avaliação das Redes Veiculares Tolerantes a Atrasos e Desconexões sob a Influência da Mobilidade Real e Sintética

**M**UITOS trabalhos utilizam modelos de mobilidade para simular os movimentos dos veículos em uma DTN veicular, prática atribuída à dificuldade em se obter movimentos reais e precisos desses veículos. Entretanto, a avaliação da rede fica prejudicada pela falta de realismo nas movimentações geradas por esses modelos, podendo nos levar a obter conclusões equivocadas. Assim, avaliar essas redes sob a influência da mobilidade real e sintética é cada vez mais importante, visto que diferentes conclusões podem ser geradas. Mediante isso, o objetivo deste capítulo é mostrar que os resultados obtidos para o desempenho dos protocolos de roteamento das DTNs veiculares, quando os nós estão sob influência da mobilidade real, pode ser bem diferente se comparado ao desempenho deles ao utilizar a mobilidade sintética. Além disso, nesse capítulo serão descritos os modelos de mobilidade veicular avaliados neste trabalho, e também será realizado um estudo da mobilidade real e sintética no encontro dos nós da rede.

## 6.1 Visão Geral

Para representar a movimentação dos nós em uma rede móvel sem fio, atualmente, são usadas duas técnicas diferentes [68, 69]: (i) a captura de informações do comportamento real da movimentação do dispositivo móvel, e (ii) o uso de modelos de mobilidade que reflitam comportamentos reais sem a necessidade de sua captura. Na primeira técnica, os registros das movimentações são capturados e utilizados para representar a mobilidade dos nós na rede avaliada. Na segunda (técnica), os modelos de mobilidade produzem *traces* sintéticos capazes de representar de forma menos precisa a mobilidade dos nós na rede.

A captura da mobilidade real dos dispositivos possibilita uma análise do comportamento de suas movimentações, além disso, podemos obter resultados mais precisos durante a avaliação de uma rede que utiliza essa mobilidade. Entretanto, a tarefa de capturar registros da mobilidade de todos os nós de uma rede pode ser uma tarefa muito difícil, ainda mais em ambientes muito dinâmicos, quando se tem um grande número de nós por um longo período de tempo. Por isso, os modelos de mobilidade são utilizados para representar a mobilidade nesse tipo de rede.

Os modelos de mobilidade podem ser classificados de diversas maneiras, visto que ainda não existe um consenso na forma de classificá-los. Neste trabalho, foi adotado a classificação proposta Mirco Musolesi e Cecilia Mascolo [70], pois eles classificam os modelos de acordo com a existência de características reais. Dessa forma, os modelos de mobilidade são classificados em: (i) modelos puramente sintéticos, e (ii) modelos baseados em *traces* reais. Modelos puramente sintéticos são aqueles que tendem a representar o movimento dos nós da rede através somente de equações analíticas. Já os modelos baseados em *traces* reais são aqueles cujas informações da mobilidade dos nós são baseadas em registros reais de suas posições.

Poucos trabalhos sobre mobilidade veicular têm sido realizados com o objetivo de capturar a movimentação real dos dispositivos móveis, menos ainda se encontram trabalhos que comparam os resultados da mobilidade real capturada com os dos modelos de mobilidade veiculares que poderiam ser usados para representar os

movimentos dos veículos nessas redes. Desse modo, neste Capítulo são apresentados alguns modelos de mobilidade os quais poderiam ser utilizados em uma DTN veicular. Em seguida, é feito um estudo destes modelos sobre os encontros dos nós, comparando os resultados com os obtidos da mobilidade real. Por fim, efetiva-se uma avaliação do desempenho dos protocolos de roteamento quando a mobilidade sintética é utilizada, verificando posteriormente o impacto de sua utilização no lugar da mobilidade real para orientar os movimentos dos veículos em uma DTN veicular.

## 6.2 Mobilidade Sintética e o Cenário Avaliado

Nesta seção são apontados os cenários e os modelos de mobilidade utilizados em nossos experimentos. Vale ressaltar que a alteração de alguns modelos tradicionais é justificada pelo fato de que queremos a criar movimentos mais próximos dos reais, e em um cenário que mais se aproxime daquele cuja mobilidade real foi capturada. O objetivo é reduzir o impacto da utilização da mobilidade sintética em relação a mobilidade real no desempenho da rede. Em resumo, para os experimentos feitos neste Capítulo, além da utilização da mobilidade real capturada, foram utilizados *traces* sintéticos gerados a partir de modelos conhecidos, cujo cenário definido procura ser uma aproximação mais realista do cenário real investigado. Estes modelos serão descritos na sequência.

### 6.2.1 Modelo Baseado em *Grids*

Este modelo é uma adaptação do modelo de mobilidade Manhattan [25, 71], no qual os nós podem se mover somente na horizontal ou na vertical, em um mapa formado por *grids*. No Manhattan, os nós estão sempre se movendo, sendo que a cada interseção o nó escolhe manter-se na mesma direção com probabilidade  $1/2$ , ou virar a direita ou a esquerda com probabilidade de  $1/4$  cada. Doravante, abreviaremos o nome deste modelo para MBG (Modelo Baseado em *Grids*) ou simplesmente *Grids*, o que facilitará as citações deste modelo ao longo do texto.

O plano inicial era utilizar o modelo Manhattan, já que este é um modelo de mobilidade veicular muito empregado e amplamente conhecido na literatura, além de sua facilidade de implementação. No entanto, os movimentos dos nós estavam muito distantes dos capturados, principalmente pela ausência do tempo de pausa, forçando-nos a alterar algumas configurações deste modelo a fim de obtermos movimentos mais realistas. Assim, optamos por fazer os nós se movimentarem com base no modelo RWP, já que as características deste modelo permitem o ajuste de seus parâmetros de acordo com as informações extraídas da mobilidade real, vistas no Capítulo 3. Entretanto, os nós continuaram se movimentando somente horizontalmente ou verticalmente através de um mapa formado por *grids*, sem obstáculos, como ocorre no modelo Manhattan. A Figura 6.1 ilustra o funcionamento deste modelo no simulador ONE, onde a movimentação de 25 nós é feita em um mapa formado por *grids*, sendo que cada *grid* é definido com um tamanho fixo de 150 X 150 metros, tamanho aproximado de um quarteirão.

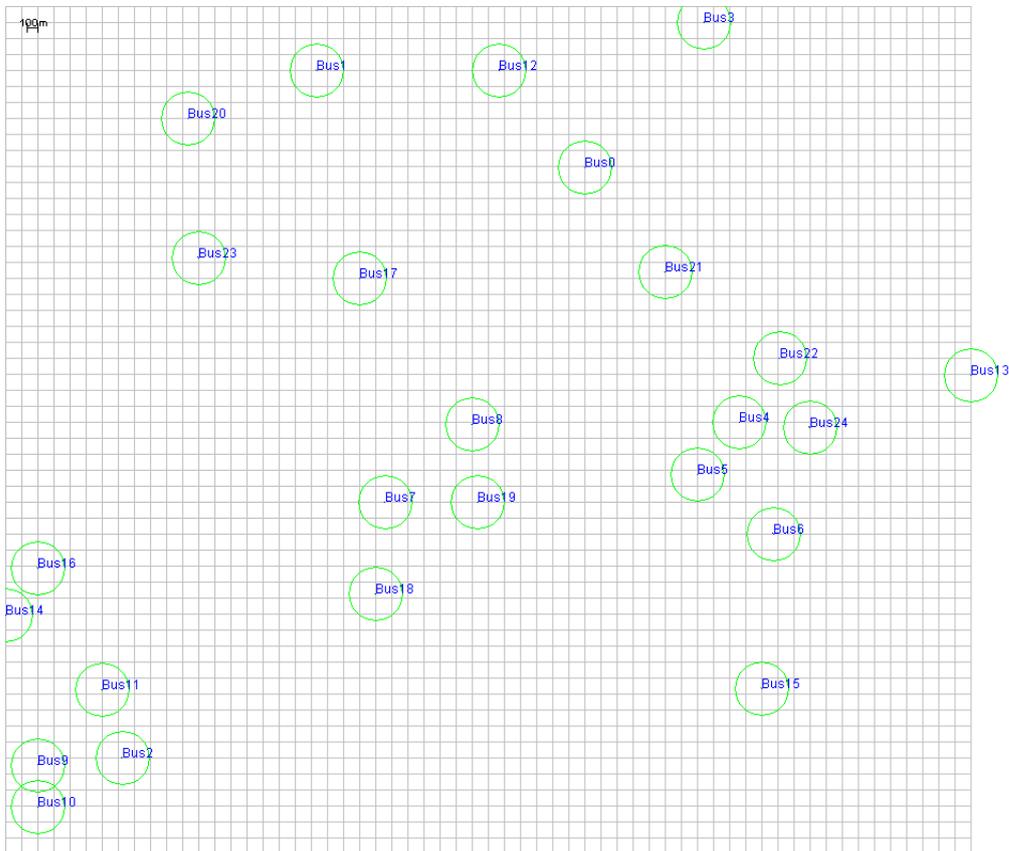


Figura 6.1: Movimentação de 25 nós através do MBG no simulador ONE.

Este modelo funciona da seguinte maneira: o posicionamento inicial dos nós é aleatório e segue uma distribuição de probabilidade uniforme dentro da área de simulação; O nó então permanece nesta posição por um intervalo de tempo aleatório (tempo de pausa); Após o término deste período, o nó escolhe uma nova posição dentro da área de simulação para seguir. Não houve a necessidade de implementar regras de borda, pois, a probabilidade dos nós percorrerem posições fora da área de simulação é zero. A velocidade de deslocamento do nó entre a origem e o destino é uniformemente distribuída entre  $v_{min}$  e  $v_{max}$ . Uma vez alcançado o destino, o nó fica novamente parado durante o novo tempo de pausa escolhido, e após o término deste período o processo é reiniciado.

O cenário para o qual os *traces* deste modelo foi criado é parecido com aquele cuja a mobilidade real foi capturada, assim os parâmetros deste modelo foram configurados de forma apropriada com base nas informações extraídas dos movimentos reais. Consequentemente, a área definida foi de 9Km X 8Km, a velocidade mínima e máxima permitida para os nós foram de 2Km/h e 83Km/h, respectivamente. O tempo de pausa também foi definido com base na mobilidade real, podendo ser escolhido de uma distribuição uniforme entre 0 e 60 segundos, visto que na mobilidade real 99% dos tempos de pausa dos veículos estiveram abaixo dos 60 segundos.

### 6.2.2 Uma evolução do City Section Mobility - CSM

Uma evolução do CSM foi desenvolvida e é citada por [21], sendo descrita brevemente no Capítulo 2. Seu objetivo é gerar sinteticamente movimentos veiculares em mapas reais, deixando a mobilidade criada ainda mais próxima da mobilidade real capturada. Portanto, foi configurado que os nós da rede devessem se movimentar de acordo com os veículos no cenário real investigado, no caso deste trabalho, através das ruas da cidade de Muriaé. O movimento dos nós no mapa segue o modelo RWP, no qual os destinos dos nós são escolhidos aleatoriamente no mapa escolhendo o menor caminho. Implementou-se também tempos de pausa após os nós chegarem aos seus destinos, bem como um limite para a velocidade máxima na qual um nó pode se movimentar.

Gerar os movimentos deste modelo através das ruas da cidade só foi possível graças as informações contidas nos *traces* capturados dos ônibus. Através deles, podemos identificar as posições de todas as localizações percorridas pela cidade, e em decorrência disso, foi possível montar um mapa no formato  $(x, y)$  contendo todas as ruas percorridas pelos ônibus. Vale enfatizar que os nós deste modelo percorrem somente as mesmas ruas em que os ônibus trafegavam, pois seria difícil obter o posicionamento de todas as ruas dessa cidade para formar um mapa mais completo.

Constituído o mapa, os 25 nós então começam a se movimentar aleatoriamente pelas ruas da cidade (sem obstáculos). Eles escolhem, de maneira aleatória, os pontos de destino e percorrem até estes pontos pelo menor caminho possível com uma velocidade escolhida aleatoriamente. Após alcançar o destino, os nós aguardam por um determinado tempo e, em seguida, escolhem outro destino. O processo, então, é reiniciado. Neste modelo são pré definidas algumas características, como as velocidades máximas, as velocidades mínimas e a distribuição do tempo de pausa. Os parâmetros definidos para este modelo são os mesmos definidos para o MBG, já que tais parâmetros foram baseados em informações extraídas da mobilidade real. Logo, as velocidades são escolhidas entre 2 e 83 Km/h, e o tempo de pausa é escolhido entre 0 e 60 segundos. A área do cenário também permaneceu a mesma, ou seja, de 9Km X 8Km.

### 6.2.3 Modelo Baseado nas Linhas dos Ônibus

Os movimentos dos ônibus públicos urbanos em uma cidade não são feitos aleatoriamente conforme simulado no modelo anterior; ao invés disso, seguem um padrão definido pela rota e horários da linha ao qual os ônibus pertencem. Para exemplificar a situação, podemos citar o ônibus que pertence a linha Napoleão. Ele trafega somente pelas ruas pré definidas para aquela linha, parando quando necessário nos pontos de ônibus para o embarque e o desembarque de passageiros, e posteriormente, parando no seu ponto final. Assim, é previsto que o ônibus da linha Napoleão nunca saia de sua rota, trafegando sempre pelas mesmas ruas. Seguindo essa idéia, foi desenvolvido um Modelo Baseado nas Linhas dos ônibus (BLM), voltado para o

trânsito da cidade de Muriaé.

Este modelo funciona da seguinte maneira. Foram definidos 25 nós, exatamente o mesmo número de ônibus circulando diariamente no cenário investigado. Atribuiu-se para cada um desses nós uma linha de ônibus na qual ele poderia se movimentar, obedecendo a relação da numeração de ônibus para cada linha definido na Tabela 3.1. Dessa forma, cada nó se movimenta aleatoriamente pelas ruas das quais um ônibus da mesma linha do nó normalmente passaria, jamais passando pelas ruas que não fazem parte de sua rota. Entretanto, existem muitas ruas que são comumente trafegadas por ônibus de diversas linhas, principalmente as ruas do centro da cidade, (em destaque) por serem os locais mais comuns dos frequentes encontros entre os nós.

O mapa composto para este modelo foi baseado nas coordenadas obtidas dos *traces* capturados via dispositivo GPS, sendo subdividido em 15 partes que se sobrepõem, cada parte correspondendo a uma linha de ônibus previamente identificada. A divisão do mapa foi necessário para que pudéssemos fazer os nós percorrerem somente através das coordenadas estipuladas para eles. Posteriormente, foi definido uma área de simulação sem obstáculos de  $9Km \times 8Km$ , com a velocidade dos nós sendo escolhida entre  $2Km/h$  e  $83Km/h$ . Os tempos de pausa também foram definidos uniformemente entre 0 e 60 segundos, sendo que as pausas nos pontos de ônibus não foram respeitados.

Vale ressaltar que, apesar deste modelo ter sido desenvolvido a princípio para o trânsito de Muriaé, ele pode ser facilmente adaptado para o tráfego dos ônibus urbanos de outras cidades, basta ter em mãos as informações sobre os horários e locais de partida e chegada dos ônibus, assim como quantos ônibus são alocados em cada linha e o percurso do qual eles fazem.

## 6.3 A Influência da Mobilidade no Encontro dos Nós

O encontro dos nós em uma DTN veicular influencia diretamente no desempenho dos protocolos de roteamento e conseqüentemente nos resultados obtidos para as métricas taxa de entrega e atraso médio. Dessa forma, é importante fazer um estudo sobre o encontro dos nós, avaliando principalmente as características dos encontros e os tempos médios de ocorrência desses encontros oportunistas. Para avaliar essas características, as métricas mais utilizadas na literatura são o **Tempo de Contato (TC)** e o **Tempo Entre Contatos (TEC)** [72, 37, 73, 74]. A definição dessas métricas será feita na sequência.

Sejam os nós  $n_1$  e  $n_2$  e  $P_{n_1}(t)$  e  $P_{n_2}(t)$  suas respectivas posições no instante  $t$ , sejam ainda  $Ac_{n_1}$  e  $Ac_{n_2}$  suas áreas de cobertura. Se no instante  $t$ ,  $P_{n_2}(t) \subset Ac_{n_1}$  e  $P_{n_1}(t) \subset Ac_{n_2}$  diz-se que  $n_1$  e  $n_2$  estão em contato no instante  $t$ . Seja  $t_i$  o instante em que  $n_1$  e  $n_2$  iniciaram o contato e  $t_f$  o instante em que os mesmos nós perderam o contato, onde  $t_f > t_i$ . Assim, o tempo de contato é definido como a diferença entre o instante em que  $n_1$  e  $n_2$  iniciaram o contato e o instante em que eles perderam o contato, ou seja,  $TC = t_f - t_i$ .

Sejam os mesmos dois nós  $n_1$  e  $n_2$ ,  $t_f$  o instante em que  $n_1$  e  $n_2$  perderam o contato e  $t_r$  o instante em que esses nós retomaram o contato, para  $t_r > t_f$ . Logo, o tempo entre contatos é a diferença entre o instante em que  $n_1$  e  $n_2$  perderam o contato e o instante em que esses nós retomaram o contato, ou seja,  $TEC = t_r - t_f$ .

### 6.3.1 Tempo de Contato

Os experimentos ocorreram da seguinte maneira. Foram utilizados os registros da mobilidade real capturada, formatados e ajustados conforme descrito na Seção 3.4, também se usou os *traces* sintéticos gerados a partir dos modelos de mobilidade descritos neste Capítulo. Estes registros foram então inseridos no simulador de DTN ONE para que pudéssemos fazer uma avaliação da rede e analisar os resultados

gerados para o TC e o TEC. O tempo total de cada simulação foi de 380 minutos, sendo que os primeiros minutos foram descartados para eliminar a fase transiente. Os modelos de mobilidade tiveram seus parâmetros ajustados à mobilidade real, sendo eles: área de  $9X8 \text{ Km}^2$ , 25 nós se movimentando, velocidades dos nós entre 2Km/h e 83Km/h, tempos de pausa entre 0 e 60 segundos, e a realização de 10 rodadas de simulação para cada cenário.

A Figura 6.3.1 mostra a ECDF dos tempos de contato ocorridos primeiramente em uma rede cujo os 25 nós possuem raio de transmissão de 100 metros e posteriormente quando possuem um raio de 250 metros. Os nós estão se movendo sob a influência da mobilidade real capturada ou da mobilidade sintética conforme indicado na figura.

Descreveremos em seguida as características dos TC da rede cujo os nós possuem raio de 100 metros (Figura 6.2(a)). Pode-se perceber que a maioria dos TC ocorridos na mobilidade real foram de até 60 segundos, totalizando cerca de 86% dos TC, fato esse atribuído às altas velocidades dos ônibus em uma área muito grande de movimentação. A média ponderada dos TC da mobilidade real nessa rede foi de 55 segundos, número ainda elevado e atribuído ao peso dos maiores valores encontrados para TC.

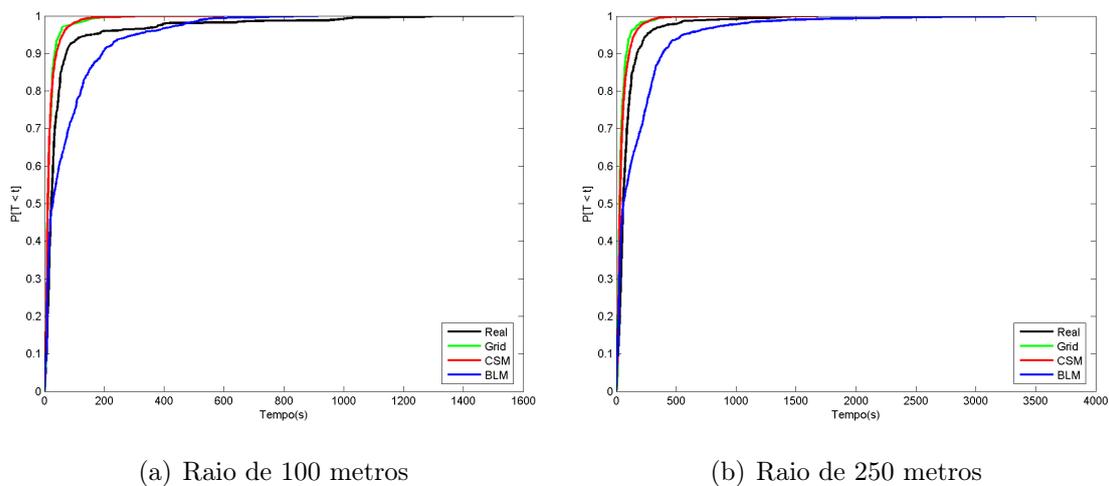


Figura 6.2: Função de distribuição cumulativa empírica dos TCs da mobilidade real e sintética.

Observa-se ainda, através da Figura 6.2(a), que somente 4% dos TC da mobilidade real foram acima de 200 segundos, sendo que os TCs muito altos ocorreram quando os ônibus estavam parados no mesmo ponto, ou melhor, no ponto final de suas linhas, já que algumas linhas de ônibus possuem os mesmos pontos finais. Vamos explicar a situação com o seguinte exemplo: Os ônibus da linha São Francisco e da linha Emcoberta compartilham os mesmos pontos de partida e ponto final; assim sendo, eles saem do ponto de partida às 10:20 horas (conforme indicado na Tabela 3.1), trafegam cada um de acordo com a rota da linha e chegam ao ponto final, que por sinal é o mesmo local do ponto de partida. Os ônibus fazem os seus trajetos em aproximadamente 30 a 35 minutos (dependendo do trânsito), e como eles saem novamente somente às 11:00 horas, eles permanecem em contato durante esse tempo em que ficam parados, gerando conseqüentemente um TC mais elevado.

Os modelos MBG e CSM apresentaram a ECDF muito próximas da Figura 6.2(a), sendo que no CSM cerca de 90% dos TCs foram abaixo de 40 segundos e somente 0.31% dos TCs foram acima dos 200 segundos. Já no MBG, 92% dos TCs foram abaixo de 40 segundos e 0.7% deles foram acima de 200 segundos. Esses resultados indicam que ambos modelos terão uma média do TC baixa. Isso é atribuído ao fato dos nós possuírem um raio de transmissão pequeno (100 metros) e apresentarem uma alta mobilidade, já que o cenário permite com que os nós percorram por muitos e diferentes trajetos, principalmente no MBG. O modelo BLM apresentou os maiores TC, já que este modelo, de um certo modo, amarra os nós aos mesmos trajetos, fazendo com que eles se concentrem próximos uns dos outros principalmente no centro da cidade, pois é o lugar onde os trajetos se cruzam. Assim, observamos que 40% dos TCs ocorridos foram acima dos 40 segundos, deixando este modelo com uma média do TC mais elevada, com proximadamente 76 segundos.

Foi gerado também um gráfico relacionando as médias dos TCs de cada mobilidade utilizada. O raio dos nós foi variado para podermos analisar a influência do raio de transmissão nos resultados obtidos. Para a obtenção destes resultados (Figura 6.3), também foram feitos 10 rodadas de simulação para cada cenário e o nível de confiança foi 95%.

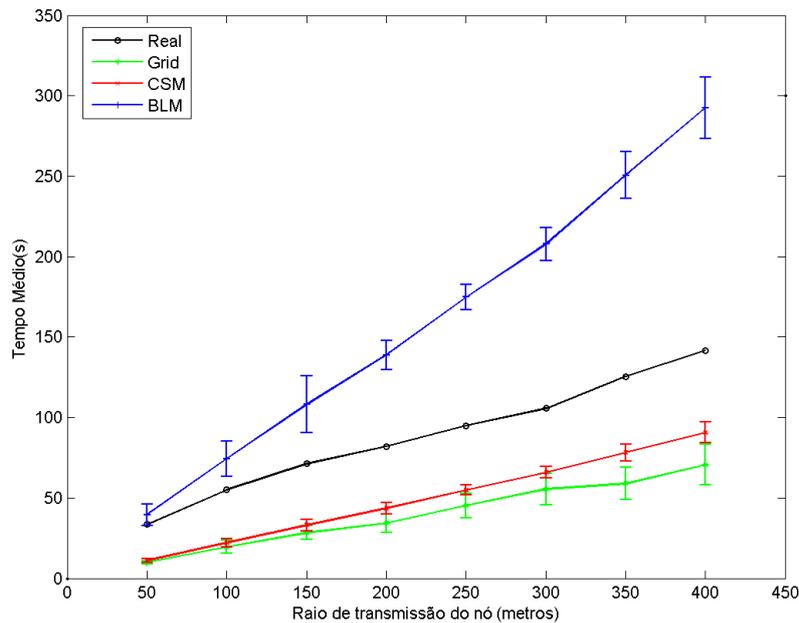


Figura 6.3: Média dos tempos de contato da mobilidade real e sintética ao variar o raio dos nós.

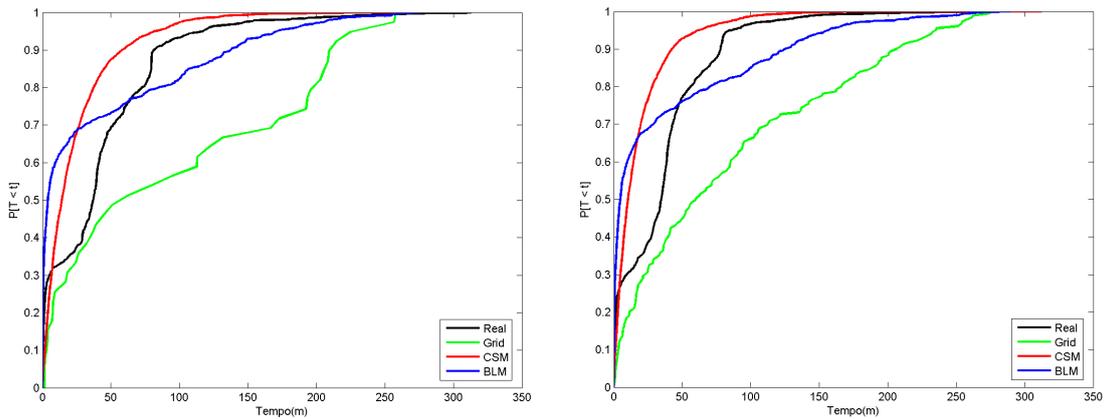
Como era de se esperar, à medida que o raio de transmissão dos nós aumenta, o TC entre eles também aumenta. Para a mobilidade real, a média que era de 33 segundos quando o raio dos nós era 50 metros, passou a ser 141 segundos quando com o raio de 400 metros. Ao comparar as medidas da mobilidade real com a mobilidade sintética, observa-se que o MBG e o CSM obtiveram um desempenho inferior ao da mobilidade real, ao contrário do BLM, cujo os TCs foram maiores do que os encontrados para a mobilidade real.

### 6.3.2 Tempo Entre Contatos

A Figura 6.3.2 mostra a ECDF dos tempos entre contatos observados em uma rede cujo os 25 nós possuem raio de transmissão de 100 metros (Figura 6.4(a)) e de 250 metros (Figura 6.4(b)). Os nós estão se movendo sob a influência da mobilidade real capturada ou da mobilidade sintética, conforme indicado na figura.

Os resultados apresentados a seguir são referentes à rede cujo os nós possuem raio de 100 metros. Observa-se para a mobilidade real que cerca de 55% dos TEC

estão entre 25 e 100 minutos, e 29% deles estão abaixo dos 5 minutos. Sabe-se que enquanto muitos ônibus se encontram muito frequentemente, principalmente no centro da cidade, onde os trajetos se cruzam, outros se encontram muito pouco, principalmente os ônibus que pertencem a mesma linha, já que os horários deles são projetados para que estejam atendendo passageiros em regiões opostas em um mesmo determinado horário.



(a) Raio de 100 metros

(b) Raio de 250 metros

Figura 6.4: Função de distribuição cumulativa empírica dos TECs das mobilidades sintéticas e da mobilidade real.

O MBG, representado pela curva *grid*, foi o que apresentou os maiores TEC, sendo que 43% dos TECs foram acima dos 100 minutos. Isso ocorre porque este modelo permite com que os nós percorram através de uma área muito extensa, fazendo com que eles demorem a se encontrar, mesmo porque o raio de transmissão considerado foi de somente 100 metros. Para o CSM e BLM, observamos que o TEC dos nós é um pouco menor, sendo que em ambos 68% de seus TECs estão abaixo dos 25 minutos. No entanto, no BLM encontramos maiores TECs, já que 24% deles estão entre 25 e 150 minutos.

Ao visualizarmos as médias dos TECs das mobilidades avaliadas ao longo dos incrementos dos raios, observa-se, como previsto, uma tendência de queda destes tempos à medida que o raio de transmissão dos nós aumenta. A média dos TECs da mobilidade real passou de 46 minutos para 28 minutos, quando o raio de transmissão dos nós variou de 50 para 400 metros. Constatamos que o MBG foi o que obteve os

maiores TECs, independente do tamanho atribuído ao raio dos nós nas simulações. O modelo no qual os nós se encontravam mais constantemente foi o CSM, já que obteve as menores médias conforme visto na Figura 6.5.

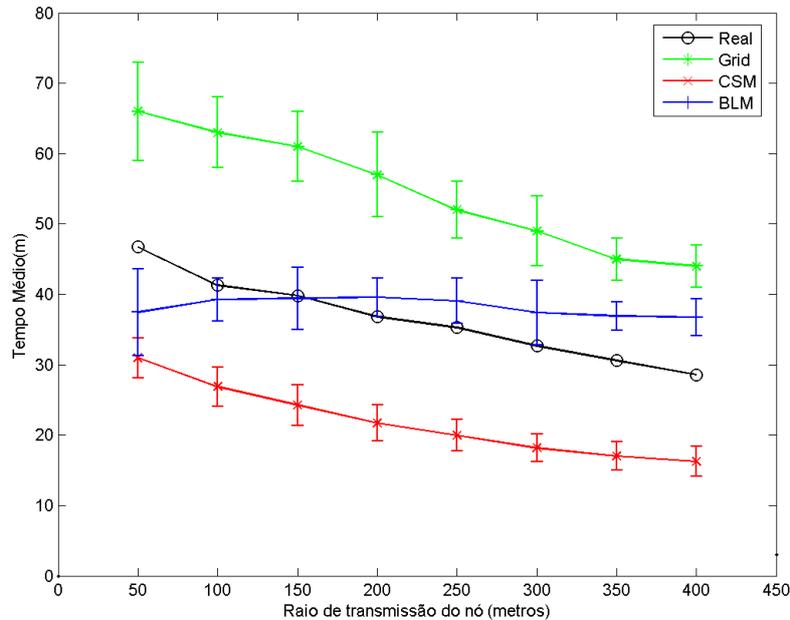


Figura 6.5: Média dos tempos entre contatos da mobilidade real e sintética ao variar o raio dos nós.

Ao avaliar o TC e o TEC da mobilidade real e da mobilidade sintética gerada, podemos afirmar que nenhum dos *traces* gerados pelos modelos de mobilidade sintéticos avaliados se aproximaram de forma satisfatória da mobilidade real. Isso nos leva a concluir que, por mais que tentemos criar modelos de mobilidade com características reais, estes dificilmente substituiriam a mobilidade real quando a intenção for fazer uma avaliação precisa da rede. Na próxima Seção, é feita uma avaliação dos protocolos de roteamento quando influenciados pela mobilidade real e sintética e, no final serão discutidos os resultados.

## 6.4 Avaliação do Desempenho dos Protocolos de Roteamento nas DTNs Veiculares sob a Influência da Mobilidade Real e Sintética

O objetivo dessa seção é investigar o impacto da mobilidade real e sintética durante as avaliações das DTNs veiculares. Dessa forma, os protocolos de roteamento foram analisados separadamente sob a influência das diferentes mobilidades utilizadas, e observou-se o desempenho deles à medida que o raio de transmissão dos nós é variado. Pode-se observar, através das figuras a seguir, o desempenho dos protocolos para as métricas taxa de entrega e atraso médio dos protocolos Epidêmico, MaxProp, Prophet e SW; quando os nós se movimentam através das mobilidades: Real, CSM, BLM e MBG.

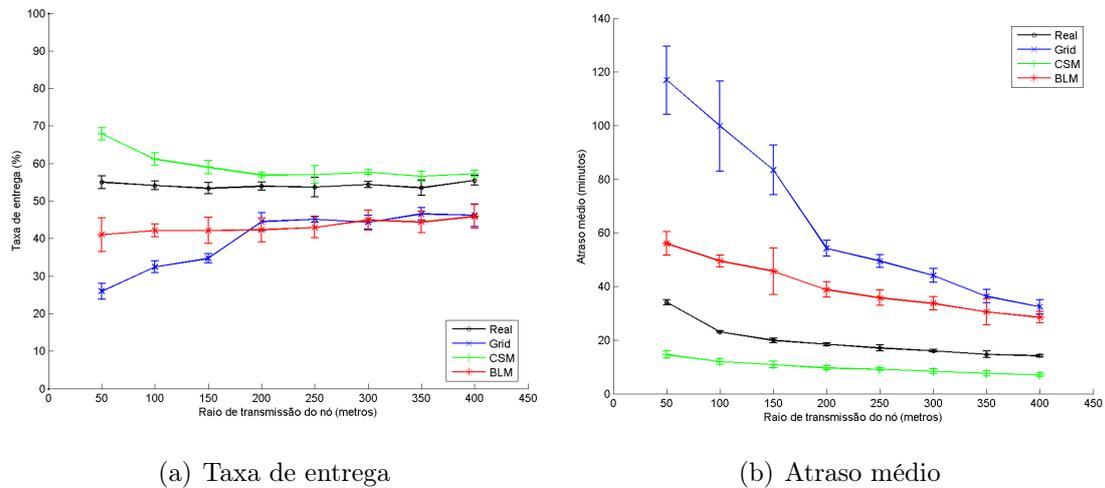
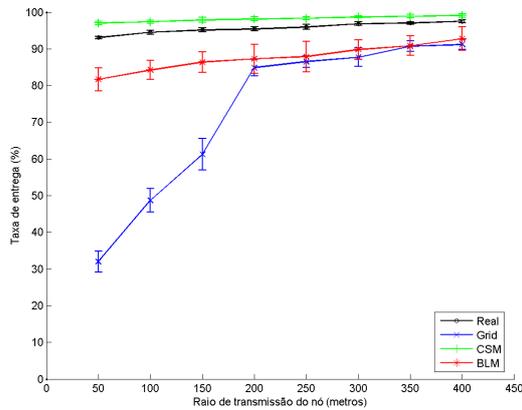
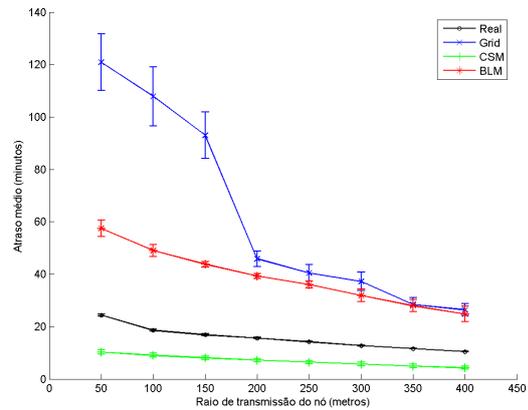


Figura 6.6: Taxa de entrega e atraso médio através do protocolo Epidêmico variando a mobilidade.

Observa-se também através de uma análise visual que para todos os modelos utilizados, o MaxProp foi o protocolo que obteve o melhor desempenho, já que obteve as melhores taxas na entrega dos pacotes. O SW também obteve um desempenho satisfatório e não ficou muito distante do MaxProp. O motivo e as atribuições para o melhor desempenho destes protocolos estão descritos no Capítulo 5, onde foi feita uma análise do desempenho deles indicando as características que os definem.

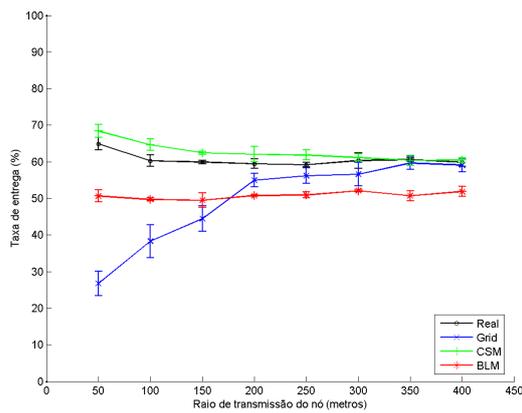


(a) Taxa de entrega

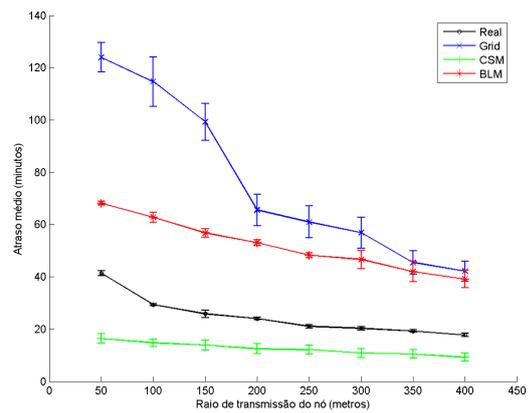


(b) Atraso médio

Figura 6.7: Taxa de entrega e atraso médio através do protocolo MaxProp variando a mobilidade.



(a) Taxa de entrega

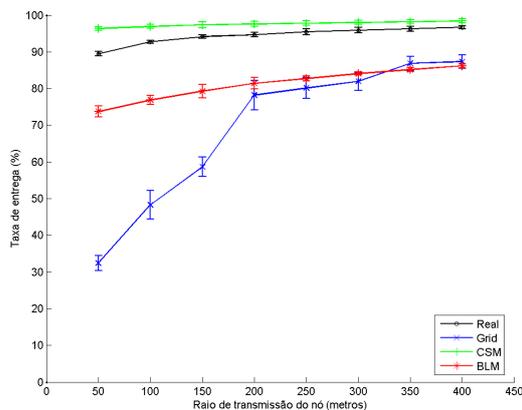


(b) Atraso médio

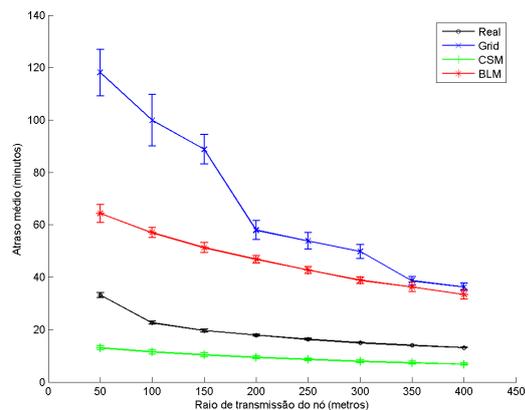
Figura 6.8: Taxa de entrega e atraso médio através do protocolo Prophet variando a mobilidade.

Pode-se observar, através das figuras, um padrão no desempenho dos protocolos avaliados, sendo que para todos eles, o CSM foi o que apresentou as melhores taxas de entrega. Isso pode ser explicado pelo fato deste modelo ter apresentado os menores TEC, fazendo, dessa forma, com que as chances dos pacotes chegarem aos seus destinos sejam maiores. Analogamente, o CSM foi o modelo que apresentou os menores atrasos médio.

O modelo que apresentou os piores resultados foi o MBG, prejudicado pela extensa área em que os nós podem percorrer, aumentando muito o seu TEC, o que se



(a) Taxa de entrega



(b) Atraso médio

Figura 6.9: Taxa de entrega e atraso médio através do protocolo *Spray and Wait* variando a mobilidade.

traduz na queda da taxa de entrega dos pacotes. Do mesmo jeito, este modelo foi o que apresentou os maiores atrasos para a entrega dos pacotes.

Pode-se concluir ainda, através dos resultados gerados, que o desempenho dos protocolos de roteamento utilizando a mobilidade sintética foram bem distantes do desempenho deles ao utilizar a mobilidade real, principalmente para os modelo BLM e MBG. De uma forma geral, o modelo que mais se aproximou da mobilidade real foi o CSM, tanto ao analisar os TEC e TC, quanto ao analisar o desempenho dos protocolos de roteamento da rede. No entanto, este modelo não foi representativo o suficiente para poder ser utilizado para substituir a mobilidade real durante uma avaliação precisa dos protocolos de uma DTN veicular. Caso fosse feito, poderíamos por exemplo ao avaliar o MaxProp, concluir equivocadamente que o atraso médio para a entrega dos pacotes no cenário avaliado era de aproximadamente 10 minutos (Figura 6.4), enquanto que na realidade o atraso médio gira em torno de 20 minutos.

## Capítulo 7

# Conclusões e Trabalhos Futuros

**N**ESTE capítulo é apresentado as principais contribuições e conclusões alcançadas neste trabalho. Além disso, faz-se um breve resumo dos resultados obtidos destacando os dados mais relevantes. Também serão discutidos as dificuldades e os desafios encontradas, assim como as soluções geradas para resolver os problemas que surgiram. Ao final, são listadas algumas sugestões de trabalhos futuros que poderão ser alcançados através das contribuições deste trabalho.

## 7.1 Considerações Finais

Através da caracterização detalhada da mobilidade veicular capturada, foi possível a obtenção de informações precisas sobre o comportamento de cada um dos componentes do movimento investigados, bem como permitiu o fornecimento de dados estatísticos importantes que poderão ser utilizados para o desenvolvimento de modelos de mobilidade mais realistas. A mobilidade foi obtida pelo pesquisador via dispositivo GPS colocado nos 25 ônibus públicos urbanos que transitam diariamente pela cidade de Muriaé, cobrindo uma área de aproximadamente  $9Km \times 8Km$ . Tal mobilidade será ainda disponibilizada para a comunidade científica como uma das contribuições deste trabalho.

Ao analisar o comportamento da mobilidade veicular, identificamos os padrões com que os motoristas dos ônibus públicos urbanos transitam pela cidade de Muriaé. A partir daí, pode-se concluir que na maior parte do tempo em que trafegam pelo trânsito, estão com uma velocidade entre  $10Km/h$  e  $35Km/h$ , suas acelerações são na maioria das vezes suaves e estão entre  $-0,5m/s^2$  e  $0,5m/s^2$ . A ocorrência de poucas mudanças bruscas de direção também foram observadas, já que na maior parte do tempo os veículos mudaram sua direção em até  $10^\circ$ . Em relação ao tempo de pausa, observamos claramente a predominância de tempos de até 20 segundos, característicos para embarque e desembarque de passageiros, sendo que tais tempos duravam em média 7 segundos.

Observou-se ainda que o intervalo de tempo utilizado para a captura das posições dos veículos influencia diretamente no comportamento dos componentes de seu movimento. Quanto menor o intervalo, mais detalhes e informações precisas pode ser obtido da mobilidade analisada. Por isso, a mobilidade utilizada para fazer avaliações das DTNs veiculares foi aquela cuja as posições dos veículos foram capturadas no menor tempo permitido pelo GPS, ou seja, a cada 2 segundos.

Posteriormente, ao ajustar algumas funções de distribuições cumulativas conhecidas aos componentes do movimento veicular capturado, observou-se que a distribuição Weibull foi a que mais se aproximou do componente velocidade e do componente

mudança de ângulo de direção dos dados reais. Já as distribuições Normal e Log-normal foram as que mais se aproximaram do componente aceleração e da medida do tempo de pausa, respectivamente. Assim, a identificação de tais distribuições proporcionou um conhecimento mais detalhado da mobilidade veicular dos ônibus no cenário investigado, podendo vir a auxiliar no desenvolvimento de novos protocolos de roteamento voltados para veículos e de simuladores de mobilidade veiculares mais realistas.

A mobilidade dos ônibus foram então sincronizadas para serem utilizadas como parâmetros de entrada em simulações feitas em uma DTN veicular, na qual foi analisado o impacto da mobilidade dos nós no desempenho dos protocolos de roteamento dessa rede, já que a mobilidade é uma das causas das desconexões nessas redes. Assim, verificou-se que para os protocolos de roteamento investigados, aquele que mais se adequou às redes veiculares foi o MaxProp, obtendo as melhores taxas de entrega dos pacotes e os menores atrasos.

Alguns modelos de mobilidade veicular conhecidos na literatura foram utilizados para analisar o comportamento da mobilidade real em relação a mobilidade gerada sinteticamente por modelos. Tais modelos tiveram seus parâmetros ajustados aos dados obtidos da mobilidade real a fim de que a mobilidade gerada fosse a mais próxima possível daquela capturada. Após a criação dessa mobilidade sintética, ela foi comparada a mobilidade real ao avaliar os seus respectivos Tempos de Contato e Tempos entre Contatos. Posteriormente, a mobilidade real e sintética foram também utilizadas para relacionar o desempenho dos protocolos de roteamento das DTNs veiculares. Por fim, observou-se que nenhuma das mobilidades sintéticas geradas, por mais que tenham sido criadas com base em informações extraídas da mobilidade real, atingiram resultados satisfatoriamente próximos da mobilidade real, sendo dessa forma inapropriadas para representar os movimentos dos ônibus durante avaliações precisas em redes veiculares.

Pode-se dizer então, que para a realização de estudos mais concisos com redes veiculares, há a necessidade de uma investigação e utilização microscópica da mobilidade dos veículos que compõem a rede, podendo dessa forma assegurar a geração

de resultados e conclusões confiáveis.

As principais dificuldades encontradas durante a realização deste trabalho consistiram na coleta dos *traces* dos ônibus. A duração da bateria do GPS era de aproximadamente uma hora e trinta minutos, e como cada trajeto era feito em aproximadamente 40 minutos, na maioria das vezes após a captura de um trajeto, era preciso que o GPS fosse novamente carregado, fazendo com que a coleta de todos os trajetos se tornasse uma tarefa demorada. Além disso, a localização do ponto final de algumas linhas de ônibus não eram muito seguras, obrigando o pesquisador a permanecer dentro do ônibus até que este voltasse a transitar novamente em direção ao centro da cidade.

Outro problema encontrado foi em relação a sincronização dos *traces* capturados; o primeiro aplicativo desenvolvido em Java para sincroniza-los apresentava problemas devido a falta de memória física do computador utilizado ao manipular as milhares de informações contidas nos *traces*. A solução então foi desenvolver um novo aplicativo, dessa vez em MATLAB, que conseguia gerenciar de forma eficiente todas as informações requeridas, gerando ao final um arquivo TXT de aproximadamente 720 mil linhas, cada qual correspondendo a posição de um ônibus em um determinado instante de tempo.

## 7.2 Trabalhos Futuros

Com base nas informações extraídas deste trabalho, propõe-se alguns trabalhos futuros:

- Pleita-se a coleta de *traces* da mobilidade veicular de ônibus de outras cidades de mesmo porte com o objetivo de confirmar as conclusões sobre quais distribuições de probabilidade estão associados a cada componente da mobilidade veicular. Além disso, a coletar desses dados em cidades de maior porte, onde os casos de engarrafamento são mais frequentes, para que dessa forma possamos melhor avaliar as medidas tempos de pausa e de parada.

- Imagina-se também o desenvolvimento de uma ferramenta que auxilie na tarefa de avaliar os *traces* coletados, ilustrando graficamente de forma automatizada as distribuições de probabilidade de cada componente do movimento, e ao final informando quais são as distribuições de probabilidades que mais se aproximam de cada componente da mobilidade avaliado.
- Aplicar a mobilidade capturada nesse trabalho em um outro simulador amplamente aceito pela comunidade, como por exemplo o simulador NS, e disponibilizar os arquivos gerados para a comunidade científica. Dessa forma, pesquisadores interessados em utilizar tal mobilidade poderiam fazer uso desse trabalho de forma mais fácil.
- Avaliar a mobilidade de outros grupos de veículos, como carros e motos, e a partir daí verificar se os resultados obtidos dessa mobilidade se aproximam daqueles obtidos pelos ônibus.
- Capturar e avaliar o componente altitude da mobilidade veicular, e verificar se tal componente influencia no desempenho dos protocolos de roteamento avaliados das DTNs veiculares.
- Utilizar as informações obtidas neste trabalho para criar um novo modelo de mobilidade que melhor se aproxime da mobilidade real capturada. Este modelos poderia por exemplo escolher as velocidades dos nós e os seus tempos de pausa com base nas distribuições de probabilidade encontradas para tais componentes, e não de forma uniforme como ocorre no RWP.
- Criar um novo protocolo de roteamento que minimize os atrasos para entrega dos pacotes para a mobilidade capturada, já que a mobilidade dos nós com o passar do tempo pode ser previsível, e dessa forma o roteamento dos pacotes pode ser aperfeiçoado com base nas informações da previsibilidade dos nós.
- Utilizar a mobilidade veicular real obtida para avaliar outros protocolos empregados em redes veiculares, para que o pesquisador possa ter consequentemente uma visão mais realista do desempenho desses protocolos em um ambiente cuja a mobilidade é real.

# Referências Bibliográficas

- [1] CORSON, S., AND MARKER, J. *Mobile Ad hoc Networking (MANET)*. IETF - RFC 2501, 1999.
- [2] ILYAS, M., AND DORF, R. C., Eds. *The handbook of ad hoc wireless networks*. CRC Press, Inc., Boca Raton, FL, USA, 2003.
- [3] NAUMOV, V., BAUMANN, R., AND GROSS, T. An evaluation of inter-vehicle ad hoc networks based on realistic vehicular traces. In *MobiHoc '06: Proceedings of the 7th ACM international symposium on Mobile ad hoc networking and computing* (New York, NY, USA, 2006), ACM, pp. 108–119.
- [4] YOUSEFI, S., MOUSAVI, M. S., AND FATHY, M. Vehicular ad hoc networks (vanets): Challenges and perspectives. In *ITS Telecommunications Proceedings, 2006 6th International Conference on* (june 2006), pp. 761 –766.
- [5] LO, S.-C., AND LU, W.-K. Design of data forwarding strategies in vehicular ad hoc networks. In *Vehicular Technology Conference, 2009. VTC Spring 2009. IEEE 69th* (26-29 2009), pp. 1 –5.
- [6] XU, Q., MAK, T., KO, J., AND SENGUPTA, R. Vehicle-to-vehicle safety messaging in dsrc. In *VANET '04: Proceedings of the 1st ACM international workshop on Vehicular ad hoc networks* (New York, NY, USA, 2004), ACM, pp. 19–28.
- [7] YIN, J., ELBATT, T., YEUNG, G., RYU, B., HABERMAS, S., KRISHNAN, H., AND TALTY, T. Performance evaluation of safety applications over dsrc

- vehicular ad hoc networks. In *VANET '04: Proceedings of the 1st ACM international workshop on Vehicular ad hoc networks* (New York, NY, USA, 2004), ACM, pp. 1–9.
- [8] BLUM, J., EKANDARIAN, A., AND HOFFMAN, L. *Performance characteristics of inter-vehicle ad hoc networking*, 1st ed. IETF - RFC 3561, 2003.
- [9] OLARIU, S., AND WEIGLE, M. C. *Vehicular Networks: From Theory to Practice*, 1st ed. Chapman e Hall/CRC, 2009.
- [10] ALVES, R., CAMPBELL, I., DE SOUZA COUTO, R., CAMPISTA, M. E. M., MORAES, I. M., RUBINSTEIN, M., COSTA, L. H., DUARTE, O. C. M. B., AND ABDALLA, M. Redes veiculares: Princípios, aplicações e desafios. In *Minicurso SBRC 2009* (may 2009).
- [11] ALVES, R. S., ABDESLEM, F. B., CAVALCANTI, S. R., CAMPISTA, M. E. M., COSTA, L. H. M. K., RUBINSTEIN, M. G., AMORIM, M. D., AND DUARTE, O. C. M. B. Uma análise experimental da capacidade de redes ad hoc veiculares. In *XXVI Simpósio Brasileiro de Telecomunicações (SBRT'08)* (September 2008).
- [12] CLAUSEN, T., AND JACQUET, P. *Optimized Link State Routing Protocol (OLSR)*. IETF - RFC 3626, Oct 2003.
- [13] PERKINS, C., BELDING-ROYER, E., AND DAAS, S. *Ad hoc On-Demand Distance Vector Routing (AODV)*. IETF - RFC 3561, Jul 2003.
- [14] JOHNSON, D., MALTZ, D. A., AND HU, Y. *DSR: The Dynamic Source Routing Protocol for Mobile Ad Hoc Networks*. Addison-Wesley, April 2001.
- [15] LU, G., MANSON, G., AND BELIS, D. Enhancing routing performance for inter-vehicle communication in city environment. In *PM2HW2N '06: Proceedings of the ACM international workshop on Performance monitoring, measurement, and evaluation of heterogeneous wireless and wired networks* (New York, NY, USA, 2006), ACM, pp. 82–89.

- [16] NAUMOV, V., BAUMANN, R., AND GROSS, T. An evaluation of inter-vehicle ad hoc networks based on realistic vehicular traces. In *MobiHoc '06: Proceedings of the 7th ACM international symposium on Mobile ad hoc networking and computing* (New York, NY, USA, 2006), ACM, pp. 108–119.
- [17] CRUCES, O. T. Applying delay tolerant protocols to vanets. Tese de Mestrado, Univ. of Catalonia, 2008.
- [18] OLARIU, S., AND WEIGLE, M. C. *Handbook on Vehicular Networks*. Taylor e Frances, 2009, ch. 10.
- [19] SILVA, R., CAMPOS, C. A. V., AND DE MORAES, L. F. Caracterização da mobilidade veicular e o seu impacto nas redes veiculares tolerantes a atrasos e desconexões. In *SBRC 2010* (may 2010).
- [20] DAVIES, V. A., VANESSA, C., DAVIES, A., AND DAVIES, V. A. Evaluating mobility models within an ad hoc network. Tese de Mestrado, Colorado School of Mines, 2000.
- [21] DJENOURI, D., SOUALHI, W., AND NEKKA, E. Vanet’s mobility models and overtaking: An overview. In *Information and Communication Technologies: From Theory to Applications, 2008. ICTTA 2008. 3rd International Conference on* (april 2008), pp. 1–6.
- [22] CAMP, T., BOLENG, J., AND DAVIES, V. A survey of mobility models for ad hoc network research. *Wireless Communications & Mobile Computing (WCMC): Special issue on Mobile Ad Hoc Networking: Research, Trends and Applications 2* (2002), 483–502.
- [23] BETTSTETTER, C., HARTENSTEIN, H., AND PÉREZ-COSTA, X. Stochastic properties of the random waypoint mobility model. *Wirel. Netw.* 10, 5 (2004), 555–567.
- [24] DELAMARE, F., DOTTI, F. L., FERNANDES, P., NUNES, C. M., AND OST, L. C. Analytical modeling of random waypoint mobility patterns. In *PE-WASUN '06: Proceedings of the 3rd ACM international workshop on Perfor-*

*mance evaluation of wireless ad hoc, sensor and ubiquitous networks* (New York, NY, USA, 2006), ACM, pp. 106–113.

- [25] BAI, F., SADAGOPAN, N., AND HELMY, A. Important: a framework to systematically analyze the impact of mobility on performance of routing protocols for adhoc networks. In *INFOCOM 2003. Twenty-Second Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications. IEEE Societies* (march-3 april 2003), vol. 2, pp. 825 – 835 vol.2.
- [26] BonnMotion: A mobility scenario generation and analysis tool. URL <http://web.informatik.uni-bonn.de/IV/Mitarbeiter/dewaal/BonnMotion/>. Último acesso em 16/01/2010.
- [27] KARNADI, F., MO, Z. H., AND CHAN LAN, K. Rapid generation of realistic mobility models for vanet. In *Wireless Communications and Networking Conference, 2007.WCNC 2007. IEEE* (march 2007), pp. 2506 –2511.
- [28] Sumo - simulation of urban mobility. URL <http://sumo.sourceforge.net>. Último acesso em 16/01/2010.
- [29] MAHAJAN, A., POTNIS, N., GOPALAN, K., AND WANG, A. Modeling vanet deployment in urban settings. In *MSWiM '07: Proceedings of the 10th ACM Symposium on Modeling, analysis, and simulation of wireless and mobile systems* (New York, NY, USA, 2007), ACM, pp. 151–158.
- [30] CABRERA, V., ROS, F., AND RUIZ, P. Simulation-based study of common issues in vanet routing protocols. In *Vehicular Technology Conference, 2009. VTC Spring 2009. IEEE 69th* (26-29 2009), pp. 1 –5.
- [31] PERKINS, C., AND ROYER, E. Ad-hoc on-demand distance vector routing. In *Mobile Computing Systems and Applications, 1999. Proceedings. WMCSA '99. Second IEEE Workshop on* (25-26 1999), pp. 90 –100.
- [32] ABEDI, O., FATHY, M., AND TAGHILOO, J. Enhancing aodv routing protocol using mobility parameters in vanet. In *Computer Systems and Applications,*

2008. *AICCSA 2008. IEEE/ACS International Conference on* (march 2008), pp. 229–235.
- [33] HUANG, H.-Y., LUO, P.-E., LI, M., LI, D., LI, X., SHU, W., AND WU, M.-Y. Performance evaluation of suvnet with real-time traffic data. *Vehicular Technology, IEEE Transactions on* 56, 6 (nov. 2007), 3381–3396.
- [34] VAHDAT, A., AND BECKER, D. Epidemic routing for partially connected ad hoc networks, 2000.
- [35] ZHANG, X., KUROSE, J., LEVINE, B. N., TOWSLEY, D., AND ZHANG, H. Study of a bus-based disruption-tolerant network: mobility modeling and impact on routing. In *MobiCom '07: Proceedings of the 13th annual ACM international conference on Mobile computing and networking* (New York, NY, USA, 2007), ACM, pp. 195–206.
- [36] BURGESS, J., GALLAGHER, B., JENSEN, D., AND LEVINE, B. N. Maxprop: Routing for vehicle-based disruption-tolerant networks. In *INFOCOM 2006. 25th IEEE International Conference on Computer Communications. Proceedings* (april 2006), pp. 1–11.
- [37] CAMPOS, C. A. *Caracterização da Mobilidade Humana e de Modelos de Mobilidade e suas Influências nas Redes Móveis*. Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, 2009.
- [38] DUNN, P. F. *Measurement and Data Analysis for Engineering and Science*, 1st ed. McGraw-Hill, 2004.
- [39] PRIESTLEY, M. B. *Spectral Analysis and Time Series*. Academic Press, 1983.
- [40] BUSSAB, W. D. O., AND MORETTIN, P. A. *Estatística Básica*, 5th ed. Saraiva, 2006.
- [41] LEON-GARCIA, A. *Probability and Random Processes for Electrical Engineering*, 2nd ed. Addison-Wesley, 1994.
- [42] DA FONSECA, J. S., AND DE ANDRADE MARTINS, G. *Curso de Estatística*, 6th ed. Atlas S.A., 1996.

- [43] Instituto brasileiro de geografia e estatística - ibge. URL <http://www.ibge.gov.br/cidadesat>. Último acesso em 16/04/2010.
- [44] Apontador gps. URL [http://www.apontadorgps.com.br/apt\\_g8.html](http://www.apontadorgps.com.br/apt_g8.html). Último acesso em 16/04/2010.
- [45] Java. URL <http://java.sun.com/>. Último acesso em 16/04/2010.
- [46] Matlab. URL <http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/toolbox/wavelet/>. Último acesso em 16/04/2010.
- [47] BETTSTETTER, C., HARTENSTEIN, H., AND PÉREZ-COSTA, X. Stochastic properties of the random waypoint mobility model: epoch length, direction distribution, and cell change rate. In *MSWiM '02: Proceedings of the 5th ACM international workshop on Modeling analysis and simulation of wireless and mobile systems* (New York, NY, USA, 2002), ACM, pp. 7–14.
- [48] MCGUIRE, M. Stationary distributions of random walk mobility models for wireless ad hoc networks. In *MobiHoc '05: Proceedings of the 6th ACM international symposium on Mobile ad hoc networking and computing* (New York, NY, USA, 2005), ACM, pp. 90–98.
- [49] MARTINEZ, F., CANO, J.-C., CALAFATE, C., AND MANZONI, P. Citymob: A mobility model pattern generator for vanets. In *Communications Workshops, 2008. ICC Workshops '08. IEEE International Conference on* (may 2008), pp. 370–374.
- [50] HÄRRI, J., FILALI, F., BONNET, C., AND FIORE, M. Vanetmobisim: generating realistic mobility patterns for vanets. In *VANET '06: Proceedings of the 3rd international workshop on Vehicular ad hoc networks* (New York, NY, USA, 2006), ACM, pp. 96–97.
- [51] MANGHARAM, R., WELLER, D. S., STANCIL, D. D., RAJKUMAR, R., AND PARIKH, J. S. Groovesim: a topography-accurate simulator for geographic routing in vehicular networks. In *VANET '05: Proceedings of the 2nd ACM*

*international workshop on Vehicular ad hoc networks* (New York, NY, USA, 2005), ACM, pp. 59–68.

- [52] SAHA, A. K., AND JOHNSON, D. B. Modeling mobility for vehicular ad-hoc networks. In *VANET '04: Proceedings of the 1st ACM international workshop on Vehicular ad hoc networks* (New York, NY, USA, 2004), ACM, pp. 91–92.
- [53] KIM, M., KOTZ, D., AND KIM, S. Extracting a mobility model from real user traces. In *INFOCOM 2006. 25th IEEE International Conference on Computer Communications. Proceedings* (april 2006), pp. 1–13.
- [54] RINNE, H. *The Weibull Distribution: A Handbook*, 1st ed. Chapman and Hall/CRC, 2008.
- [55] Nist/sematech e-handbook of statistical methods. URL <http://www.itl.nist.gov/div898/handbook/>. Último acesso em 24/04/2010.
- [56] MEYER, P. L. *Probabilidade - Aplicações à Estatística*, 1st ed. Editora S.A., 1969.
- [57] JAIN, R. *The Art of Computer Systems Performance Analysis*. New York, NY, USA: John Wiley and Sons, 1991.
- [58] LINDGREN, A., DORIA, A., AND SCHELÉN, O. Probabilistic routing in intermittently connected networks. *SIGMOBILE Mob. Comput. Commun. Rev.* 7, 3 (2003), 19–20.
- [59] JONES, E. P. C., LI, L., AND WARD, P. A. S. Practical routing in delay-tolerant networks. In *WDTN '05: Proceedings of the 2005 ACM SIGCOMM workshop on Delay-tolerant networking* (New York, NY, USA, 2005), ACM, pp. 237–243.
- [60] BALASUBRAMANIAN, A., LEVINE, B., AND VENKATARAMANI, A. Dtn routing as a resource allocation problem. In *SIGCOMM '07: Proceedings of the 2007 conference on Applications, technologies, architectures, and protocols for computer communications* (New York, NY, USA, 2007), ACM, pp. 373–384.

- [61] SPYROPOULOS, T., PSOUNIS, K., AND RAGHAVENDRA, C. S. Spray and wait: an efficient routing scheme for intermittently connected mobile networks. In *WDTN '05: Proceedings of the 2005 ACM SIGCOMM workshop on Delay-tolerant networking* (New York, NY, USA, 2005), ACM, pp. 252–259.
- [62] SPYROPOULOS, T., PSOUNIS, K., AND RAGHAVENDRA, C. S. Spray and focus: Efficient mobility-assisted routing for heterogeneous and correlated mobility. In *Pervasive Computing and Communications Workshops, 2007. PerCom Workshops '07. Fifth Annual IEEE International Conference on* (march 2007), pp. 79–85.
- [63] DEMERS, A., GREENE, D., HAUSER, C., IRISH, W., LARSON, J., SHENKER, S., STURGIS, H., SWINEHART, D., AND TERRY, D. Epidemic algorithms for replicated database maintenance. In *PODC '87: Proceedings of the sixth annual ACM Symposium on Principles of distributed computing* (New York, NY, USA, 1987), ACM, pp. 1–12.
- [64] VOGELS, W., VAN RENESSE, R., AND BIRMAN, K. The power of epidemics: robust communication for large-scale distributed systems. *SIGCOMM Comput. Commun. Rev.* 33, 1 (2003), 131–135.
- [65] SPYROPOULOS, T., PSOUNIS, K., AND RAGHAVENDRA, C. S. Efficient routing in intermittently connected mobile networks: the multiple-copy case. *IEEE/ACM Trans. Netw.* 16, 1 (2008), 77–90.
- [66] KERANEN, A., AND OTT, J. The one: The opportunistic network environment simulator.
- [67] LI, X., SHU, W., LI, M., HUANG, H., AND WU, M.-Y. Dtn routing in vehicular sensor networks. In *Global Telecommunications Conference, 2008. IEEE GLOBECOM 2008. IEEE* (30 2008-dec. 4 2008), pp. 1–5.
- [68] CAMPOS, C. A. V., OTERO, D. C., ALBUQUERQUE, L. R., AND MORAES, L. F. M. Mobilidade em redes sem fio ad hoc. In *Minicurso do V Workshop de Comunicação Sem Fio e Computação Móvel (WCSF2003)* (2003), pp. 5–40.

- [69] CAMP, T., BOLENG, J., AND DAVIES, V. A survey of mobility models for ad hoc network research. *Wireless Communications & Mobile Computing (WCMC): Special issue on Mobile Ad Hoc Networking: Research, Trends and Applications 2*, 5 (2002), 483–502.
- [70] MUSOLESI, M., AND MASCOLO, C. Mobility models for systems evaluation. *Middleware for Network Eccentric and Mobile Applications* (2009), 43–62.
- [71] HÄRRI, J., FILALI, F., BONNET, C., HÄRRI, J., FILALI, F., AND BONNET, C. Mobility models for vehicular ad hoc networks: A survey and taxonomy, 2006.
- [72] MARFIA, G., PAU, G., GIORDANO, E., DE SENA, E., AND GERIA, M. Vanet: On mobility scenarios and urban infrastructure. a case study. In *2007 Mobile Networking for Vehicular Environments* (may 2007), pp. 31–36.
- [73] CAI, H., AND EUN, D. Y. Toward stochastic anatomy of inter-meeting time distribution under general mobility models. In *MobiHoc '08: Proceedings of the 9th ACM international symposium on Mobile ad hoc networking and computing* (New York, NY, USA, 2008), ACM, pp. 273–282.
- [74] KARAGIANNIS, T., LE BOUDEC, J.-Y., AND VOJNOVIĆ, M. Power law and exponential decay of inter contact times between mobile devices. In *MobiCom '07: Proceedings of the 13th annual ACM international conference on Mobile computing and networking* (New York, NY, USA, 2007), ACM, pp. 183–194.