COPPE/UFRJ

CARACTERIZAÇÃO DA MOBILIDADE HUMANA E DE MODELOS DE MOBILIDADE E SUAS INFLUÊNCIAS NAS REDES MÓVEIS

Carlos Alberto Vieira Campos

Tese de doutorado 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 Doutor em Engenharia de Sistemas e Computação.

Orientador: Luís Felipe Magalhães de Moraes

Rio de Janeiro

Setembro de 2009

CARACTERIZAÇÃO DA MOBILIDADE HUMANA E DE MODELOS DE MOBILIDADE E SUAS INFLUÊNCIAS NAS REDES MÓVEIS

Carlos Alberto Vieira Campos

TESE 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 DOUTOR EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA DE SISTEMAS E COMPUTAÇÃO.

Aprovada por:

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

Prof. Antonio Alfredo Ferreira Loureiro, Ph. D.

Prof. Célio Vinicius Neves de Albuquerque, Ph. D.

Prof. Claudio Luis de Amorim, Ph. D.

Prof. Felipe Maia Gauvão França, Ph.D.

Prof. José Ferreira de Rezende, Dr.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

SETEMBRO DE 2009

Campos, Carlos Alberto Vieira

Caracterização da Mobilidade Humana e de Modelos de Mobilidade e suas Influências nas Redes Móveis/Carlos Alberto Vieira Campos. - Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2009.

XXIII, 138 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Luís Felipe Magalhães de Moraes

Tese (doutorado) - UFRJ/COPPE/Programa de Engenharia de Sistemas e Computação, 2009.

Referências Bibliográficas: p. 123-138.

1. Redes Móveis Sem Fio. 2. Mobilidade Humana. 3. Modelos de Mobilidade. 4. Avaliação de Desempenho. 5. Redes Tolerantes a Atraso 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 este trabalho aos meus pais, Walter Campos e Elísia de Jesus Vieira Campos (in memorian), por toda a dedicação que tiveram na minha formação como pessoa. Dedico também ao meu padrinho Ataíde Carlos Vieira (in memorian).

Agradecimentos

Primeiramente, gostaria de agradecer à Deus pelo dom da vida e por tudo que ele tem me proporcionado.

Agradeço, de modo especial, aos meus pais por tudo que fizeram por mim nesta vida, principalmente pelo amor, amizade e carinho recebido, e ainda, pela dedicação investida na minha formação como indivíduo. À minha irmã Margareth pela amizade e constante apoio. A vocês o meu muito obrigado por tudo e me desculpem pela ausência ao longo desses anos.

Agradeço também de maneira especial à Marcelle, minha namorada e futura esposa, pelo amor, apoio e carinho recebido ao longo desses anos. Graças a você que sempre esteve do meu lado, eu consegui inspiração para a realização deste trabalho. Obrigado por você e sua família fazerem parte da minha vida.

Agradeço ao meu orientador, Prof. Luís Felipe M. de Moraes, pelos ensinamentos e apoio ao meu trabalho ao longo do mestrado e do doutorado. Agradeço também aos demais integrantes da banca, os professores Antonio A. F. Loureiro, Célio V. N. Albuquerque, Claudio L. de Amorim, Felipe M. G. França e José F. de Rezende, por aceitarem avaliar o trabalho e pelas contribuições para a melhoria do mesmo.

Registro aqui um agradecimento, muito especial, a todas as pessoas voluntárias que permitiram a coleta de sua movimentação pelo parque Quinta da Boa Vista, no período de janeiro a maio de 2008, para serem utilizadas na nossa pesquisa de caracterização da mobilidade humana.

Gostaria de agradecer também ao professor Edison Ishikawa, do Instituto Militar de Engenharia, e ao pesquisador Marcelo D. Amorim, da Université Pierre et Marie Curie, pelas sugestões ao trabalho no período da qualificação. Gostaria de agradecer de modo especial à Aline C. Viana, pesquisadora do INRIA, pela amizade ao longo desses anos, pela revisão da tese e pelas diversas sugestões para a melhoria da mesma.

Aos amigos do laboratório RAVEL: Airon, Alexandre Mendes, Alexandre Pinaffi, Claudia, Daniel, Danielle, Denilson, Diogo, Fred, Júlio César, Luciano, Luís Rodrigo, Marcos Cesar, Schiller, Vilela, Vina e Vitor que sempre me ajudaram e proporcionaram uma excelente convivência ao longo desses anos, na qual foi importantíssimo para o desenvolvimento deste trabalho. Gostaria de agradecer também de modo especial ao Gustavo Dias, Rafael Bezerra, Rafael Fernandes e Tiago Azevedo pelas intensas discussões sobre o assunto e pela ajuda na implementaçao de algumas partes dos códigos utilizados na tese. Também neste laboratório tiveram alguns amigos que, de maneira especial, me ajudaram a aliviar o peso das dificuldades encontradas ao longo do caminho, tais como: Bruno Nunes, Eduardo Hargreaves, Fernando Veríssimo, Michelini, Paulo Ditarso, entre outros.

Gostaria de agradecer o aprendizado recebido, dentro e fora de sala de aula, de todos os professores da COPPE, com quem tive o prazer de conviver ao longo desses anos, e aos amigos conquistados dentro e fora da UFRJ como, por exemplo, nos laboratórios LAND, LCP e GTA. Um agradecimento especial ao Antônio Augusto (Guto), Bernardo Netto, Cleber Pereira e Kleber Cardoso pela amizade e por tudo que já fizeram por mim.

À minha família aqui do Rio, em especial, Tia Geralda *(in memorian)*, Berlice, Beatriz, Berardo, Breno, Emília, Ingrid, Amanda e Déia, que me acolheram e sempre me ajudaram quando eu precisei. Agradeço também a toda a minha grande família de Minas e peço desculpas, principalmente aos meus tios Terezinha (Teca), Maria do Rozário, Rita, Antônia, Waldir, aos meus afilhados Caio Henrique e Hugo, e a Dalvany (Dalva) pela minha ausência. Agradeço também a compreensão de todos os meus amigos por minha ausência ao longo desse período.

Agradeço ao Departamento de Informática Aplicada da Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro - UNIRIO e, principalmente, aos professores Morganna Diniz e Sidney Lucena por toda a ajuda recebida desde o meu início como professor (março/2009), o que permitiu a minha dedicação na conclusão do doutorado.

À Cláudia, Solange, Lúcia, Sônia, Mercedes, Adilson e Itamar, que trabalham na secretaria e no suporte do PESC/COPPE, a Carol do LAND e não menos importante, agradeço à Lourdes pelos incontáveis cafezinhos que tomei nesse período.

Por fim, agradeço a todos os professores que me ensinaram desde os meus 4 anos de idade até no curso de graduação na UNIMONTES, especialmente Antônio E. Silva, Rosivaldo A. Gonçalves e Sérgio de Oliveira. Ao PESC/COPPE e aos órgãos de fomento: CAPES, CNPq e FINEP, pelo financiamento deste trabalho.

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

CARACTERIZAÇÃO DA MOBILIDADE HUMANA E DOS MODELOS DE MOBILIDADE E SUAS INFLUÊNCIAS NAS REDES MÓVEIS

Carlos Alberto Vieira Campos

Setembro/2009

Orientador: Luís Felipe Magalhães de Moraes

Programa: Engenharia de Sistemas e Computação

A representação do movimento é um dos componentes mais importantes na avaliação do desempenho e no projeto das redes móveis, nas quais os modelos de mobilidade são utilizados para essa representação. Entretanto, pouco se sabe a respeito da proximidade desses modelos aos dados de movimentação real. Assim, estudar as características desse movimento é o objeto de investigação da presente tese. Para isso, uma nova proposta para a caracterização da movimentação de usuários em ambientes sem fio é apresentada. Essa caracterização é realizada através de uma análise espaço-temporal da mobilidade e tem o objetivo de investigar, quantitativa e qualitativamente, os componentes do movimento e outras medidas de interesse. Assim, esses componentes e medidas de interesse permitirão um maior conhecimento do comportamento de movimentação dos usuários móveis. Além disso, apresentamos uma metodologia para essa caracterização, com o intuito de aumentar a precisão dos resultados a serem obtidos. Também foi realizada uma captura da movimentação humana, através de equipamento de GPS, em um cenário real e importantes resultados foram obtidos. Adicionalmente, é proposta uma nova técnica para o ajuste dos modelos de mobilidade aos dados de movimentação humana capturados permitindo assim, uma validação desses modelos. Os modelos de mobilidade Browniano, *Levy-walk*, MMIG, *Random Waypoint* e *Smooth* foram ajustados e avaliados através desta técnica, e vários resultados foram obtidos. Após a investigação sobre essa mobilidade, uma avaliação de desempenho das redes tolerantes a atrasos foi realizada. Nesta avaliação, é verificada a influência da mobilidade no encontro dos nós e no desempenho dos protocolos Epidêmico, PROPHET e *Spray and Wait*. Deste modo, diversos resultados importantes foram obtidos e analisados.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

CHARACTERIZATION OF HUMAN MOBILITY AND MOBILITY MODELS AND ITS EFFECTS ON MOBILE NETWORKS

Carlos Alberto Vieira Campos

September/2009

Advisor: Luís Felipe Magalhães de Moraes

Department: Systems Engineering and Computer Science

The modeling of movement is one of the most important components in performance evaluation and the design of mobile networks, in which mobility models are used for this representation. However, there is little knowledge about how close these models are from representing real movement. Thus, the objective of this thesis is to study the characteristics of this movement in a recreational environment. To do so, a new user movement characterization in wireless environments is proposed. This characterization is realized through a space-temporal analysis of mobility and has as goal to investigate, quantitatively and qualitatively, the components of movement and other measures of interest. Therefore, these components and measures of interest will allow a better understanding of mobile user movement behavior. Moreover, we present a methodology for such characterization in order to increase the accuracy of results to be obtained. Also human movement was captured, by GPS equipment, in a real scenario and several results were obtained. In addition, a new technique for adjustment of mobility models to data from human movement captured were proposed, allowing a validation of these models. Then, the mobility models: Brownian, Levy-walk, MMIG, Random Waypoint and Smooth were adjusted and evaluated using this technique, in which several results were obtained. After investigating the mobility aspect, performance evaluation on delay tolerant networks was realized. In this evaluation, the influence of mobility in the encounter of nodes and in the performance of Epidemic, PROPHET and Spray and Wait protocols is verified. Thus, several important results were achieved and analyzed.

Conteúdo

Resumo **viii**

Abstract **ix**

Lista de Figuras **xv**

Lista de Tabelas **xix**

Lista de Acrônimos **xx**

Definições e Notações **xxii**

1 Introdução **1**

1.1 As Tecnologias de Transmissão Sem Fio 1

1.2 Motivação e Definição do Problema 5

1.3 Objetivos 7

1.4 Contribuições da Tese 10

1.5 Organização do Texto 11

2 Representação da Mobilidade em Redes Móveis Sem Fio **13**

2.1 Modelos de Mobilidade 13

2.1.1 Modelos Puramente Sintéticos 15

2.1.2 Modelos Baseados em *Traces* 17

2.1.3 *Frameworks* para a representação da mobilidade 18

2.1.4 Discussão 21

2.2 Uma Melhoria no Modelo Markoviano de Mobilidade Individual Genérico (MMIG) 21

2.3 Considerações Finais 26

3 Proposta de Caracterização da Mobilidade de Dispositivos Sem Fio 27

3.1 Motivação e Trabalhos Relacionados 27

3.2 Visão Geral da Proposta 29

3.3 Análise Espaço-Temporal da Mobilidade 29

3.3.1 Definição dos Componentes do Movimento 30

3.3.2 Identificação das Mudanças Bruscas no Movimento 32

3.4 Uma Metodologia Proposta para a Caracterização da Mobilidade . . 37

3.4.1 Definição dos Cenários de Observação 37

3.4.2 Captura e Processamento dos Dados 39

3.4.3 Análise Estatística dos Dados 40

3.4.4 Identificação de Padrões de Comportamento 41

3.4.5 Visualização dos Resultados Encontrados 42

3.5 Considerações 42

4 Uma Investigação Sobre a Mobilidade Humana Capturada em uma Área de Lazer 44

4.1 Caracterização da Mobilidade Humana Capturada em uma Área de Lazer 44

4.1.1 Descrição dos Experimentos 45

4.1.2 Processamento dos Dados Capturados 47

4.1.3 Resultados Obtidos 49

4.2 Ajuste de Algumas Funções de Distribuição de Probabilidade em Relação as Componentes do Movimento Capturado 55

4.2.1 Velocidade 56

4.2.2 Aceleração 57

4.2.3 Ângulo de mudança de direção 57

4.2.4 Tempo de pausa 58

4.3 Conclusões 59

5 Uma Proposta de Técnica para o Ajuste de Modelos de Mobilidade 62

5.1 Introdução 62

5.2 Trabalhos Relacionados 64

5.3 A Técnica de Ajuste Proposta 66

5.3.1 O Algoritmo de Ajuste 67

5.3.2 Comentários sobre o algoritmo 70

5.4 Ajustando Vários Modelos de Mobilidade em Relação a Dados de Mobilidade Humana 71

5.4.1 Modelos de Mobilidade Avaliados 72

5.4.2 Características das Simulações e da Técnica de Ajuste 73

5.4.3 Resultados Obtidos 75

5.5 Conclusões 83

6 Uma Avaliação das Redes Tolerantes a Atrasos e Desconexões sob o Impacto da Mobilidade Real e Sintética 87

6.1 Introdução 88

6.2 Trabalhos Relacionados 89

6.3 Um Estudo Sobre a Influência da Mobilidade no Encontro dos Nós . 93

6.3.1 Características da Simulação 94

6.3.2 Distribuição Cumulativa Complementar do Tempo de Contato - DCCTC 95

6.3.3 Distribuição Cumulativa Complementar do Tempo entre Contatos - DCCTEC 98

6.4 Uma Avaliação dos Protocolos de Roteamento das DTNs sob a Influência da Mobilidade 101

6.4.1 Características da Simulação 102

6.4.2 O Impacto na Taxa de Entrega 103

6.4.3 Resultados Obtidos do Atraso Médio das Mensagens Entregues 105

6.4.4 Resultados da Sobrecarga de Mensagens Repassadas pelos Protocolos de Roteamento em Relação as Mensagens Entregues . 107

6.5 Conclusões 110

7 Conclusões e Trabalhos Futuros 115

7.1 Considerações Finais 115

7.2 Dificuldades Encontradas ao Longo desta Pesquisa 118

7.2.1 A obtenção de movimento humano em cenários reais 118

7.2.2 O ajuste dos modelos de mobilidade a dados de movimentação real 119

7.2.3 Como escolher um modelo de mobilidade 120

7.3 Perspectivas para Trabalhos Futuros 121

Bibliografia **123**

Lista de Figuras

2.1 Mapa conceitual da representação da mobilidade nas comunicações sem fio. 19

2.2 *Framework* IMPORTANT 20

2.3 Diagrama de transição de estados da cadeia de Markov para representar o movimento, nas direções x e y, do modelo MMIG. 23

3.1 Componentes geométricos de um movimento qualquer. 31

3.2 Etapas da metodologia proposta 38

4.1 Ilustração do GPS utilizado nos experimentos. 46

4.2 Amostras de *traces* de movimento humano no parque Quinta da Boa Vista. 49

4.3 Função de distribuição de probabilidade empírica do componente velocidade. 51

4.4 Função de distribuição de probabilidade empírica do componente aceleração. 52

4.5 Função de distribuição de probabilidade empírica do componente ângulo de mudança de direção. 53

4.6 Função de distribuição de probabilidade empírica da medida tempo de pausa. 54

4.7 Autocorrelação de cada componente do movimento real. 55

4.8 Função de distribuição cumulativa empírica da velocidade e uma comparação com as funções de distribuição cumulativa Exponencial, Gamma, Lognormal, Normal e Weibull. 57

4.9 Função de distribuição cumulativa empírica da aceleração e uma comparação com a função de distribuição cumulativa Normal. 59

4.10 Função de distribuição cumulativa empírica do componente ângulo de mudança de direção e uma comparação com as funções de distribuição cumulativa Exponencial, Gamma, Lognormal, Normal e Weibull. . . . 60

4.11 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 Fluxograma do algoritmo de ajuste. 68

5.2 Distribuição cumulativa empírica da velocidade dos dados reais e dos modelos Browniano, MMIG, *Levy-walk*, RWP e *Smooth*. 79

5.3 Distribuição cumulativa empírica da aceleração dos dados reais e dos modelos Browniano, MMIG, *Levy-walk*, RWP e *Smooth*. 80

5.4 Distribuição cumulativa empírica do ângulo de direção dos dados reais e dos modelos Browniano, MMIG, *Levy-walk*, RWP e *Smooth*. 81

5.5 Distribuição cumulativa empírica do tempo de pausa dos dados reais e dos modelos Browniano, MMIG, *Levy-walk*, RWP e *Smooth*. 82

5.6 Autocorrelação do componente velocidade da mobilidade real e da sintética. 83

5.7 Autocorrelação do componente aceleração da mobilidade real e da sintética. 84

5.8 Autocorrelação do componente ângulo de direção da mobilidade real e da sintética. 85

5.9 Autocorrelação da medida tempo de pausa na mobilidade real e da sintética. 85

5.10 Gráfico de dispersão dos pontos que indicam a relação entre o ângulo de direção α e a velocidade v de um nó, capturados no instante $t \in [0, 600]$ segundos, para cada conjunto de experimentos reais e simulados pelos modelos de mobilidade. 86

6.1 *Snapshot* da tela de interface do simulador ONE com base na mobilidade humana. 95

6.2 DCCTC da mobilidade real e sintética para o raio de transmissão de 10 e 25 metros. 96

6.3 DCCTC da mobilidade real e sintética para o raio de 50, 75 e 100 metros. 97

6.4 DCCTEC da mobilidade real e sintética para o raio 10 e 25 metros. . 98

6.5 DCCTEC da mobilidade real e sintética para o raio de transmissão de 50, 75 e 100 metros. 99

6.6 Taxa de entrega de mensagens no cenário de mobilidade real variando o protocolo de roteamento. 104

6.7 Taxa de entrega através do protocolo Epidêmico variando a mobilidade. 105

6.8 Taxa de entrega através do protocolo PROPHET variando a mobilidade. 106

6.9 Taxa de entrega através do protocolo *Spray and Wait* variando a mobilidade. 107

6.10 Atraso médio das mensagens no cenário de mobilidade real para os três protocolos de roteamento. 108

6.11 Atraso médio das mensagens sob o protocolo Epidêmico variando-se o tipo de mobilidade. 109

6.12 Atraso médio das mensagens sob o protocolo PROPHET variando-se o tipo de mobilidade. 110

6.13 Atraso médio das mensagens sob o protocolo *Spray and Wait* variando-se o tipo de mobilidade. 111

6.14 Sobrecarga das mensagens no cenário de mobilidade real para os três protocolos de roteamento. 112

6.15 Sobrecarga das mensagens sob o protocolo Epidêmico. 113

6.16 Sobrecarga das mensagens sob o protocolo PROPHET. 113

6.17 Sobrecarga das mensagens sob o protocolo *Spray and Wait*. 114

Lista de Tabelas

3.1 Exemplos de situações ou cenários de uso de redes (móveis) sem fio. . 39

4.1 Medidas para cada componente do movimento real 50

4.2 MSE e K-S entre os componentes da mobilidade humana e algumas funções de distribuição de probabilidade. 58

5.1 Parâmetros dos modelos de mobilidade ajustados pelo algoritmo proposto 76

5.2 Medidas para cada componente do movimento real e dos modelos *Smooth* e Browniano 77

5.3 Medidas para cada componente dos modelos RWP, MMIG e *Levy-walk* 78

Lista de Acrônimos

CDMA	:	*Code Division Multiple Access*;
CRAWDAD	:	*Community Resource for Archiving Wireless Data At Dartmouth*;
CSMA/CD	:	*Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection*;
DCCTC	:	Distribuição Cumulativa Complementar do Tempo de Contato;
DCCTEC	:	Distribuição Cumulativa Complementar do Tempo Entre Contatos;
DTN	:	*Delay/disruption Tolerant Network*;
GPRS	:	*General Packet Radio Service*;
GPS	:	*Global Positioning System*;
IEEE	:	*Institute of Eletrical and Electronics Engineers*;
IMPORTANT	:	*Impact of Mobility on Performance of RouTing protocols for Adhoc NeTworks*;
K-S	:	*Kolmogorov-Smirnov*;
MAC	:	*Media Access Control*;
MANET	:	*Mobile Ad hoc NETworks*;
MEED	:	*Minimum Estimated Expected Delay*;
MLE	:	*Maximum Likelihood Estimation*;
MMIG	:	Modelo Markoviano de Mobilidade Individual Genérico;
MSE	:	*Mean Square Error*;
ONE	:	*Opportunistic Network Environment simulator*;
PROPHET	:	*Probabilistic Routing Protocol using History of Encounters and Transitivity*;
RAPID	:	*Resource Allocation Protocol for Intentional DTN*;
RFID	:	*Radio-Frequency IDentification*;
RWP	:	*Random WayPoint*;

SW	:	*Spray and Wait*;
TC	:	Tempo de Contato;
TEC	:	Tempo Entre Contatos;
UMTS	:	*Universal Mobile Telecommunications System*;
VANET	:	*Vehicular Ad hoc NETworks*;
WiFi	:	*Wireless Fidelity*;
WIMAX	:	*Worldwide Interoperability for Microwave Access*;
WLAN	:	*Wireless Local Area Networks*;
WMAN	:	*Wireless Metropolitan Area Networks*;
WMN	:	*Wireless Mesh Networks*;
WPAN	:	*Wireless Personal Area Networks*;
WSN	:	*Wireless Sensor Networks*;
WWAN	:	*Wireless Wide Area Networks*;

Definições e Notações

S	:	conjunto do espaço de estados da cadeia de Markov do modelo MMIG; (pág. 22)
Δ_{max}	:	indica o deslocamento máximo permitindo em uma transição da cadeia de Markov; (pág. 22)
b	:	base do incremento nas posições ($X \rightarrow X'$, ou $Y \rightarrow Y'$); (pág. 22)
e	:	estado da extrema direita da cadeia de Markov; (pág. 22)
$-e$	:	estado da extrema esquerda da cadeia de Markov; (pág. 22)
k	:	representa o estado atual na cadeia de Markov; (pág. 23)
j	:	representa o próximo estado na cadeia de Markov; (pág. 23)
s	:	variável que indica o sentido do movimento; (pág. 23)
$p_{k,j}$	:	probabilidade de ir para o estado (j) no próximo intervalo de tempo, dado que o nó móvel está atualmente no estado (k); (pág. 23)
m	:	é o valor da soma de todas as probabilidades, para qualquer estado à direita (à esquerda)do estado atual, seguindo as regras do diagrama de transição de estados do modelo MMIG; (pág. 23)
$\vec{P}_i(t_j)$	:	indica o vetor que representa a posição do i-ésimo dispositivo no instante t_j; (pág. 30)
$\alpha_i(t_j)$	:	representa o ângulo de mudança de direção do movimento do i-ésimo dispositivo no instante t_j; (pág. 31)
$\beta_i(t_j)$	:	é o ângulo complementar de $\alpha_i(t_j)$; (pág. 31)
$V_i(t_j)$	:	velocidade escalar do i-ésimo dispositivo no instante t_j; (pág. 31)
$A_i(t_j)$	:	aceleração escalar do i-ésimo dispositivo no instante t_j; (pág. 32)

$\Delta\alpha_i(t_j)$	:	variação do ângulo de mudança de direção do i-ésimo dispositivo no instante t_j; (pág. 32)
$Ab_i(t_j)$	:	aceleração brusca do i-ésimo dispositivo no instante t_j; (pág. 33)
γ	:	é o limiar utilizado para identificar uma aceleração brusca; (pág. 33)
Nab_i	:	é o número de acelerações bruscas do i-ésimo dispositivo; (pág. 33)
$Tp_i(t_j)$	:	tempo de pausa do i-ésimo dispositivo no instante t_j; (pág. 34)
$p_i(t_j)$	:	pausa no movimento do i-ésimo dispositivo no instante t_j; (pág. 34)
Np_i	:	é a v.a. que representa a quantidade de ocorrências de pausas no movimento do i-ésimo dispositivo; (pág. 34)
$Mb\alpha_i(t_j)$	:	mudança brusca de direção do i-ésimo dispositivo no instante t_j; (pág. 34)
ζ	:	é o limiar utilizado para identificar a ocorrência de uma mudança brusca de direção; (pág. 35)
$Nmb\alpha_i$	:	é a v.a. que representa a quantidade de ocorrências de mudanças bruscas de direção no movimento do i-ésimo dispositivo; (pág. 35)
$R(k)$	:	é a autocorrelação de uma v.a. $X(t)$; (pág. 35)
μ	:	é a média de uma v.a. $X(t)$; (pág. 35)
k	:	é o intervalo de tempo entre duas observações da v.a. $X(t)$; (pág. 35)
σ^2	:	é a variância da v.a. $X(t)$; (pág. 35)
$\langle\alpha_i\rangle$	:	é a média amostral do ângulo de mudança de direção do i-ésimo dispositivo; (pág. 36)
$\langle V_i\rangle$	:	é a média amostral da velocidade do i-ésimo dispositivo; (pág. 36)
$\langle A_i\rangle$	:	é a média amostral da aceleração do i-ésimo dispositivo; (pág. 36)
$\langle Tp_i\rangle$	:	média amostral do tempo de pausa do i-ésimo dispositivo; (pág. 36)
$MSE(f'(x))$	:	é a média dos erros quadráticos de uma função $f'(x)$ em relação a função $f(x)$; (pág. 67)
Ac_{n_i}	:	é a área de cobertura do i-ésimo dispositivo; (pág. 93)
t_i	:	é o tempo ínicial de um contato entre dois nós n_1 e n_2; (pág. 93)
t_f	:	é o tempo final de um contato entre dois nós n_1 e n_2; (pág. 93)
TC	:	representa o tempo de contato entre dois nós n_1 e n_2; (pág. 93)
TEC	:	representa o tempo entre contatos de dois nós n_1 e n_2; (pág. 94)

Capítulo 1

Introdução

O ADVENTO da Internet foi uma das maiores contribuições da ciência da computação e áreas correlatas para a sociedade nas últimas décadas, principalmente no contexto da disseminação e troca de informações em larga escala. Por traz da Internet, têm-se as redes de computadores que são um dos seus principais componentes e que tem como principal função, a interligação dos dispositivos computacionais a fim de permitir a transmissão de dados entre esses dispositivos. Uma das classificações dessas redes baseia-se no tipo de meio físico de transmissão utilizado, podendo ser transmissões com fio (redes cabeadas) ou sem fio. A área de redes de computadores sem fio está em constante transformação e, por isso, possui vários problemas para a investigação científica, dentre eles o tratado na presente tese de doutorado.

1.1 As Tecnologias de Transmissão Sem Fio

As comunicações sem fio, onde a transmissão de dados se dá no espaço livre (meios não confinados), vêm adquirindo importância cada vez maior nos últimos anos, tanto no cenário científico, quanto nas indústrias da computação e das telecomunicações. Este fato pode ser observado pela utilização, cada vez mais freqüente, dos dispositivos sem fio: telefones celulares, *laptops, palmtops, smartphones*, entre

outros. Na última década, várias tecnologias de redes sem fio foram propostas e desenvolvidas pela comunidade científica e pela indústria especializada. Assim, com o intuito de facilitar a contextualização de cada tecnologia das redes sem fio, a seguir será apresentada uma classificação dessas redes levando-se em consideração as distâncias envolvidas no uso dos equipamentos sem fio em questão.

- Redes Pessoais Sem Fio (*Wireless Personal Area Networks* - WPAN): são redes de curto alcance (alguns metros) e taxas de transmissão de kbps até dezenas de Mbps, que têm a função de interligar dispositivos pessoais dos usuários. Como exemplo de tecnologia, tem-se o Bluetooth (padrão IEEE 802.15.1) [1];

- Redes Locais Sem Fio (*Wireless Local Area Networks* - WLAN): são redes locais utilizadas em escritórios, casas e prédios, cujo alcance de transmissão vai de dezenas de metros a alguns quilômetros e taxas de transmissão de até centenas de Mbps. Como exemplo dessas redes tem-se o padrão IEEE 802.11 e suas variações [2];

- Redes Metropolitanas Sem Fio (*Wireless Metropolitan Area Networks* - WMAN): são redes sem fio com um alcance maior do que o das WLANs, chegando a dezenas de quilômetros e que têm a função de prover um serviço de acesso banda larga sem fio para regiões metropolitanas. A tecnologia mais conhecida desse tipo de rede é o padrão IEEE 802.16 e suas variações [3];

- Redes de Longa Distância Sem Fio (*Wireless Wide Area Networks* - WWAN): são redes de longo alcance (centenas ou milhares de quilômetros) e os exemplos mais conhecidos são: o padrão IEEE 802.20 [4] e as tecnologias de transmissão de dados via celular (GPRS, CDMA2000 e UMTS) [5].

Todos esses tipos de redes sem fio ainda estão em pesquisa e possuem desafios a serem enfrentados. Um exemplo disso é o suporte à mobilidade, que tem se tornado um dos alvos de pesquisa e desenvolvimento na área de redes sem fio. Desse modo, novos tipos ou abordagens para as redes sem fio estão sendo desenvolvidas. Essas abordagens devem possuir as seguintes características: auto-configuração dos dispositivos, auto-organização da rede, auto-gerenciamento dos recursos, mobilidade dos

usuários (dispositivos) e, em alguns casos, a troca de informações entre dispositivos sem a necessidade de uma infra-estrutura de comunicação pré-existente e de maneira transparente para os usuários.

A existência dessas características nas novas abordagens das redes sem fio permitirão a comunicação dos dados na tão esperada "computação ubíqua", que foi mencionada pela primeira vez por Mark Weiser, pesquisador da Xerox Parc [6].

Assim, como exemplos dessas novas abordagens têm-se:

- Redes Sem Fio Ad Hoc (*Wireless Ad Hoc Networks*): são redes sem fio em que os dispositivos não necessitam de uma infra-estrutura pré-existente para a transmissão dos dados. Desta maneira, os dispositivos sem fio trocam informações diretamente ou através de dispositivos intermediários que agem como roteadores dessas informações na rede. A partir desta abordagem, surgiram as redes móveis *ad hoc* (*Mobile Ad Hoc Networks* - MANETs), que são redes *ad hoc* nas quais os dispositivos sem fio são móveis. Mais detalhes sobre as MANETs podem ser encontrados em [7, 8, 9]. Recentemente, estudos sobre as redes ad hoc veiculares (*Vehicular Ad Hoc Networks* - VANETs) estão sendo realizados, como pode ser visto em [10, 11];

- Redes de Sensores Sem Fio (*Wireless Sensor Networks* - WSNs): são redes compostas por sensores sem fio que, geralmente, possuem uma pequena capacidade de processamento, armazenamento e transmissão de dados. São utilizadas para capturar dados, do cenário onde estão inseridos, e enviá-los para um nó central [12]. Além disso, os sensores podem ser fixos ou móveis. Aplicações e a infra-estrutura dessas redes estão sendo intensamente investigadas pela comunidade científica [13, 14, 15].

- Redes em Malha Sem Fio (*Wireless Mesh Networks* - WMNs): são redes que possuem uma infra-estrutura de comunicação composta por roteadores *mesh* sem fio, a qual é utilizada para a comunicação entre os dispositivos clientes, que podem ser fixos ou móveis. Entretanto, essas redes também permitem que os dispositivos clientes possam comunicar entre si sem o uso dos roteadores

mesh. A implementação desse tipo de rede pode ser através do uso dos padrões IEEE 802.11 e IEEE 802.16 com algumas modificações. Detalhes dessas redes podem ser encontrados em [16];

- Redes Tolerantes à Atrasos e Desconexões (*Delay/disruption Tolerant Networks* - DTNs): são classificadas como um tipo de MANET, que caracteriza-se por uma comunicação com alta latência, grande taxa de perda de pacotes, conectividade intermitente, limitação de recursos dos dispositivos de comunicação e alta taxa de erros [17, 18]. Normalmente, seus dispositivos possuem uma intensa mobilidade.

Dentre as redes sem fio, mencionadas acima, muitos estudos e pesquisas têm sido feitos em torno das MANETs. Conforme descrito anteriormente, essas redes não necessitam da disponibilidade de uma infra-estrutura de comunicação pré-existente para a troca de informações, proporcionando assim uma maior flexibilidade e acrescentando novas aplicações ao uso das tecnologias sem fio, que até então não eram possíveis [7, 19]. Além disso, nestas redes os dispositivos podem se movimentar. Assim, tarefas como, roteamento e encaminhamento de dados, controle de acesso ao meio físico e gerenciamento do consumo de energia podem se tornar mais complexas. Em outras palavras, a mobilidade dos dispositivos sem fio acrescenta problemas e desafios, que até então não existiam e que devem ser tratados e enfrentados, respectivamente.

O projeto e a avaliação de desempenho de protocolos e aplicações para as MANETs são afetados diretamente por diversos fatores, tais como: a interferência eletromagnética de equipamentos eletroeletrônicos, o tipo de tráfego transmitido na rede e a mobilidade dos dispositivos sem fio, como pode ser visto em [19, 20, 21, 22, 23]. Dessa maneira, esses fatores devem ser levados em consideração nas avaliações de protocolos e soluções propostas.

Após a contextualização do presente trabalho, serão descritas nas seções abaixo, a motivação e definição do problema, os objetivos e as contribuições desta proposta. Por fim, será apresentado um resumo contendo a descrição dos próximos capítulos.

1.2 Motivação e Definição do Problema

Como identificado na literatura, esforços estão sendo feitos, pela comunidade científica, na busca de novas propostas de algoritmos e protocolos mais adequados à utilização das MANETs em cenários específicos. Sendo assim, o desempenho dessas propostas deve ser avaliado. Para possibilitar essa avaliação, podem ser utilizadas três técnicas clássicas de avaliação de desempenho de sistemas computacionais, descritas em [24, 25], que são: analítica, simulação e medição. A seguir, essas técnicas serão descritas e contextualizadas para a avaliação de desempenho das MANETs.

A técnica analítica possibilita uma representação do funcionamento de um sistema através da utilização de "ferramentas matemáticas" existentes, como: teoria da informação, teoria de filas, processos estocásticos, teoria da renovação, teoria dos grafos, entre outras. Dessa forma, essas ferramentas possibilitam uma representação do seu funcionamento e/ou uma análise numérica do problema representado, permitindo assim a realização de uma avaliação de desempenho consistente e rápida.

Entretanto, representar um determinado sistema através da técnica analítica, em geral, pode não ser uma tarefa fácil pois, impõe ao pesquisador o requisito de possuir fortes conhecimentos dessas ferramentas matemáticas. Além disso, quando o sistema a ser representado é muito complexo, essa técnica possibilita uma representação aproximada desse sistema, devido à necessidade de simplificações nessa representação para torná-la numericamente tratável. Geralmente, essas simplificações tornam a utilização da técnica analítica distante do comportamento real do sistema modelado e, portanto, pode ser necessária uma validação dos resultados obtidos analiticamente. Essa validação pode ser feita através das outras técnicas: simulação e/ou medição, que serão descritas a seguir.

A técnica de simulação busca reproduzir um comportamento real através do uso de sistemas computacionais para a representação sintética desse comportamento. Dessa forma, avaliar o desempenho desse comportamento através da utilização de programas ou sistemas computacionais denominados simuladores, normalmente é mais simples do que utilizar a técnica analítica e, por causa disso, a técnica de simu-

lação é muito utilizada. Todavia, a representação por simulação do funcionamento de um determinado comportamento ou sistema é, na maioria das vezes, uma aproximação dos sistemas reais desenvolvida sinteticamente e que pode ser incompleta devido às simplificações realizadas na representação desse comportamento ou sistema. Isso também acontece com a técnica analítica, como descrito anteriormente. Dessa forma, a confiabilidade dos resultados obtidos através dessas técnicas pode ser, às vezes, variável ou até mesmo questionável. Isso será comentado especificamente para os modelos de mobilidade no texto da Seção 5.1. Com base em Maag, Viana e Zaïdi [26], a emulação é uma outra importante técnica de avaliação de desempenho de sistemas que complementa a técnica de simulação.

A outra técnica de avaliação é a medição, que é realizada através da observação real de um sistema, onde dados relacionados ao funcionamento do próprio sistema são capturados para serem analisados. Essa análise pode ser realizada no momento da captura ou *a posteriori*. A medição é a forma na qual se pode obter resultados mais confiáveis[1], entretanto, em algumas situações, a captura de dados pode não ser escalável, viável ou factível [24]. No caso específico das MANETs e das DTNs, a técnica de medição não era muito realizada devido à existência de poucos *testbeds* e de redes desse tipo em operação. No entanto, devido à necessidade de validação e testes das soluções propostas, nos últimos anos, a comunidade científica e a indústria estão se empenhando, cada vez mais, no desenvolvimento de ambientes reais (*testbeds*) de uso das MANETs e das DTNs como pode ser visto em [11, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36].

Recentemente, Maag e outros [26] apresentaram uma moderna classificação das técnicas para a avaliação e projeto de protocolos de comunicação, onde categorizam-as em técnicas formais (análise matemática, verificação formal, teste e abordagem híbrida) e em técnicas não-formais (simulação, emulação, *testbed* e prototipagem).

Na avaliação de desempenho das MANETs, as técnicas de modelagem analítica

[1]Resultados confiáveis implicam em resultados obtidos depois de um adequado tratamento, onde foram retirados ou corrigidos eventuais erros do processo de coleta e/ou análise. Caso contrário, os resultados obtidos podem conter erros e assim, gerar uma avaliação de desempenho inconsistente e questionável [24, 27, 28].

e de simulação são largamente utilizadas devido à facilidade de se obter resultados em um tempo menor e/ou com um pequeno investimento financeiro, como descrito acima. Porém, recentemente, os trabalhos [23, 26, 27, 28, 37, 38, 39, 40] mostraram problemas, erros, e/ou fraquezas encontradas nas pesquisas, ocasionadas por inconsistências no uso dessas técnicas para a avaliação das MANETs. Assim, avaliar o desempenho de protocolos para MANETs através da técnica de medição é cada vez mais necessário.

Adicionalmente, alguns trabalhos [23, 33, 34, 36, 37, 41, 42, 43] mostraram que variações na representação das MANETs podem impactar o funcionamento dos protocolos que realizam funções como, por exemplo, o controle de acesso ao meio, gerenciamento do consumo de energia, o roteamento e o encaminhamento dos dados, etc. Além disso, essas variações podem impactar no funcionamento de outros componentes e/ou medidas de interesse em uma MANET. Assim, uma correta representação dessas características e funções são muito importantes para que se tenha uma adequada avaliação dos protocolos e aplicações em MANETs. Dessa forma, o contexto da presente tese de doutorado é estudar detalhadamente as características e a representação da mobilidade dos dispositivos em um cenário real, tanto do ponto de vista de simulação, quanto do ponto de vista de medição.

1.3 Objetivos

O propósito desta tese é investigar em profundidade as características da movimentação dos dispositivos móveis e o impacto, via simulação, dessa mobilidade no funcionamento de uma rede móvel sem fio. Com base nisso, esta tese tem como objetivo:

(i) Caracterizar e obter conhecimento do comportamento de movimentação dos dispositivos sem fio em cenários reais;

(ii) Verificar a proximidade ou adequação dos modelos de mobilidade utilizados nas pesquisas, comparando-os com a mobilidade dos dispositivos em cenários reais e;

(iii) Investigar o impacto da mobilidade real e sintética na avaliação de desempenho, via simulação, de algum tipo de rede móvel sem fio.

Para isso, registros de movimentação real de pessoas foram capturados e utilizados em uma investigação, com o intuito de possibilitar uma caracterização da mobilidade desses dispositivos. Essa caracterização foi realizada através de uma análise qualitativa e quantitativa dos componentes da mobilidade (velocidade, aceleração e ângulo de mudança de direção) extraídas desses registros de movimentação. Medidas de interesse e métricas de avaliação serão definidas e utilizadas nessa caracterização. Além disso, busca-se também verificar o nível de proximidade ou adequação dos modelos de mobilidade, comparando-os com os registros de movimentação real, ou seja, pretende-se avaliar o quão próximo de uma realidade (mobilidade real dos dispositivos) estão os modelos de mobilidade. Por fim, almeja-se avaliar o desempenho das redes móveis sem fio, via simulação, sob a influência dos diferentes tipos de mobilidade (real $\times$ sintética).

De uma maneira mais objetiva, esta tese pretende responder as seguintes perguntas:

1- Qual é o comportamento de movimentação dos usuários sem fio em situações e/ou cenários do mundo real?

Comentário: Atualmente não se tem muito conhecimento sobre o movimento real dos dispositivos sem fio. Assim, apresentaremos no Capítulo 3 desta tese uma proposta de caracterização do movimento que compreende uma análise espaço-temporal do movimento e uma metodologia para essa caraterização. Esta análise pretende extrair os componentes do movimento desses dispositivos e, se possível, a correlação entre esses componentes, ou seja, a possível existência de um comportamento nesse movimento. Isso é importante para se ter conhecimento sobre o movimento em si e também para aplicar esse conhecimento no desenvolvimento de modelos de mobilidade mais realistas.

2- Existem características específicas no comportamento dessa movimentação? Como são estas características?

Comentário: Essa pergunta visa averiguar a existência de "padrões" no comportamento e, em caso positivo, caracterizar esses padrões de maneira quantitativa e qualitativa. Para isso, através da nossa proposta de caraterização (vide Capítulo 3) será calculada a autocorrelação de um determinado componente e a relação entre os componentes da mobilidade dos dispositivos. Esta análise será primordial para a identificação desses "padrões" de mobilidade específicos, caso isso seja observado. Também através da análise espaço-temporal serão obtidos "o como e a intensidade" desse comportamento. Isso será realizado através do uso das medidas estatísticas (média, desvio padrão, variância, autocorrelação, etc) obtidas dos componentes extraídas da mobilidade e que serão utilizadas, se possível, na qualificação e quantificação desses comportamentos. Esta análise também será importante para o desenvolvimento de novos modelos de mobilidade mais realistas. Um estudo sobre movimentação real buscando responder essas perguntas será apresentado no Capítulo 4.

3- Como comparar os modelos de mobilidade com os registros de movimentação real?

Comentário: Como existem diversas situações e cenários diferentes de mobilidade, é importante ajustar os modelos de mobilidade (configurar os seus parâmetros de acordo com as características da mobilidade real) em relação aos registros de movimentação real de cenários específicos de modo que esses modelos sejam corretamente utilizados e comparados. No Capítulo 5 apresentaremos uma proposta de técnica para o ajuste dos modelos de mobilidade em relação a dados reais.

4- Qual é a proximidade ou semelhança dos modelos de mobilidade com os registros de movimentação capturados em cenários reais?

Comentário: Essa pergunta tem como objetivo verificar se os modelos de mobilidade utilizados nas avaliações de desempenho (disponíveis na literatura) são adequados para o cenário a ser avaliado. Isso é necessário para se verificar o nível de confiabilidade dessas avaliações quanto ao uso dos modelos de mobilidade para representar a mobilidade em questão. Para isso, no Capítulo 5 apresentaremos uma comparação de alguns modelos de mobilidade em relação à dados reais. Importantes

resultados foram obtidos e também serão apresentados.

5- Será que existe um ou mais modelos de mobilidade que possuem características realistas, ou seja, modelos adequados para um cenário de utilização das redes móveis?

Comentário: Essa pergunta está relacionada com a pergunta anterior e que também será respondida no final do Capítulo 5.

6- Será que o desempenho dos protocolos em uma rede móvel sob o impacto dos registros de movimentação real é parecido quando utiliza-se modelos de mobilidade?

Comentário: Um estudo sobre esse contexto é apresentado no Capítulo 6, onde é realizada uma avaliação de como acontece o encontro dos nós e do desempenho de alguns protocolos de roteamento das DTNs, sob a influência da mobilidade real e sintética. Importantes resultados foram obtidos e serão discutidos neste capítulo.

Estes questionamentos têm sido feitos pela comunidade científica e uma intensa discussão a respeito está ocorrendo recentemente, como pode ser verificado nos projetos CRAWDAD - *Community Resource for Archiving Wireless Data At Dartmouth*[2] e Haggle[3]. Entretanto, vários desses problemas ainda estão em aberto.

Buscando-se alcançar esses objetivos e responder essas perguntas, na próxima seção as contribuições da presente tese de doutorado serão apresentadas.

1.4 Contribuições da Tese

Com a elaboração desta tese, as seguintes contribuições foram alcançadas:

[2]CRAWDAD é um projeto da Universidade de Dartmouth que armazena dados de experimentos diversos da comunidade de redes sem fio [44, 45].

[3]Haggle é um projeto que propõe uma nova arquitetura de rede para comunicações oportunísticas [35].

- Uma melhoria no modelo Markoviano para a representação da mobilidade em cenários sem obstáculos [46];
- Uma nova proposta para a caracterização da mobilidade de dispositivos numa rede móvel baseada em uma análise espaço-temporal da mobilidade [47, 48];
- Uma metodologia de coleta e análise de dados referentes à mobilidade (real e sintética) dos dispositivos sem fio [48];
- A obtenção de registros de mobilidade humana capturados no parque Quinta da Boa Vista na cidade do Rio de Janeiro [49]. Estes registros poderão ser utilizados pela comunidade científica;
- Aplicação da proposta de caracterização na obtenção de características estatisticamente quantificadas da mobilidade humana capturada no parque Quinta da Boa Vista [49];
- Uma nova proposta de técnica para o ajuste dos parâmetros de configuração dos modelos de mobilidade em relação a dados de movimentação real [50];
- Uma avaliação de desempenho para as DTNs, sob diferentes tipos de modelos de mobilidade e sob dados de mobilidade real. Foi realizado um estudo sobre o encontro dos nós e de alguns protocolos de roteamento para as DTNs [51].

1.5 Organização do Texto

O restante desta tese está organizada da seguinte forma. No Capítulo 2 é feita uma revisão bibliográfica da mobilidade para as redes sem fio dos tipos de modelos de mobilidade existentes para redes móveis, dos trabalhos de caracterização e de simulação em MANETs que foram utilizados como referência para o desenvolvimento desta tese de doutorado. Por fim, será apresentada uma melhoria no modelo Markoviano de mobilidade para a realização de simulações mais adequadas através deste modelo.

O Capítulo 3 apresenta uma nova proposta de caracterização da mobilidade dos dispositivos sem fio. Essa proposta baseia-se na utilização de uma análise da mobilidade com base no aspecto espaço-temporal do movimento dos dispositivos em relação ao tempo. Além disso, nesse capítulo será descrita uma nova metodologia de coleta, tratamento e análise dos dados obtidos para que essa proposta de caracterização ofereça resultados confiáveis.

No Capítulo 4 é realizado um estudo de caso, onde a mobilidade humana foi capturada em uma área de lazer. Assim, é apresentada a descrição dos experimentos de coleta da movimentação de pedestres realizados em um parque. Além disso, os dados capturados através de um dispositivo de GPS, de alta precisão, são analisados e os resultados obtidos serão apresentados e discutidos.

Com o objetivo de comparar alguns modelos de mobilidade com os dados reais apresentados no capítulo anterior, é apresentada, no Capítulo 5, uma técnica de ajuste de modelos de mobilidade com base em dados reais. Assim, ao longo desse capítulo são apresentados: a técnica proposta, os modelos avaliados e os resultados obtidos.

No Capítulo 6, uma avaliação de desempenho das redes tolerantes a atrasos e desconexões é realizada para se verificar a influência de diferentes tipos de mobilidade. Para isso foi utilizado um simulador específico para essas redes. A avaliação consiste de uma análise do impacto da mobilidade sobre o contato dos nós e sobre alguns protocolos de roteamento. Diversos resultados são apresentados e discutidos.

Por fim, o Capítulo 7 descreve as considerações finais da tese, onde as principais contribuições alcançadas são sumarizadas. Além disso, são discutidos os desafios e dificuldades encontradas durante o desenvolvimento desta tese. Por fim, serão descritas algumas direções de trabalhos futuros a serem investigadas baseadas nos resultados obtidos.

Capítulo 2

Representação da Mobilidade em Redes Móveis Sem Fio

NESTE capítulo serão apresentados os principais conceitos e trabalhos relacionados com os modelos de mobilidade. Assim sendo, serão descritos os principais modelos e trabalhos sobre mobilidade, além dos trabalhos relacionados com simulações em MANETs. Por fim, será apresentada uma modificação no modelo Markoviano de mobilidade individual genérico (MMIG).

2.1 Modelos de Mobilidade

Para representar a movimentação de usuários em uma rede móvel sem fio têm-se duas maneiras [19, 52]: (i) através da captura de informações do comportamento real da movimentação do dispositivo móvel, ou seja, o armazenamento do registro de movimentação (*trace*) real do dispositivo móvel e, (ii) através da utilização de modelos de mobilidade, onde tenta-se representar o comportamento da movimentação dos dispositivos sem fio sem o uso desses registros de movimentação.

A captura dos registros de movimentação pode possibilitar uma observação do comportamento real de movimentação desses dispositivos, principalmente quando se tem um grande número desses dispositivos durante um longo período de observa-

ção. Entretanto, em ambientes muito dinâmicos, como em MANETs, capturar esses registros não é uma tarefa fácil, devido ao fato dessas redes não estarem em ativo uso. Além disso, as MANETs ainda estão em fase de pesquisa e desenvolvimento, o que dificulta a obtenção de *traces* de cenários reais. Assim, é necessária a utilização de modelos de mobilidade para representar a movimentação dos dispositivos.

Dentro desse contexto, a atividade de desenvolver modelos para a representação da mobilidade está cada vez mais intensa na comunidade científica, devido à rápida evolução das tecnologias de redes móveis. Por causa dessa evolução, ainda não existe um consenso na forma de classificação desses modelos. Com isso, existem várias classificações propostas na literatura que serão descritas a seguir.

Tracy Camp e outros [19] classificam os modelos de mobilidade em dois tipos: *modelos de mobilidade individual* e *modelos de mobilidade em grupo*. Os modelos individuais representam o comportamento de movimentação de um dispositivo de forma independente do restante da rede. Consiste numa modelagem mais simples e de fácil implementação, visto que a representação dos dispositivos é realizada através de eventos independentes, não tendo nenhuma correlação entre estes. Devido a tais características, esses modelos são os mais usados nos trabalhos de avaliação de sistemas em redes móveis sem fio. Na literatura existem diversos modelos propostos, como os descritos em [19, 20, 22, 23, 53, 54]. O outro tipo de classificação é a mobilidade em grupo, onde o comportamento de movimentação dos dispositivos possuem dependência em relação ao restante da rede. Por isso, são modelos mais complexos e de difícil implementação, e portanto, menos utilizados. Como exemplos de modelos em grupo, têm-se os descritos em [19, 55, 54, 56].

Fan Bai e outros [23] classificam a mobilidade através de quatro fatores principais: *aleatoriedade, dependência temporal, dependência espacial* e *restrições geográficas*. Além disso, nesse artigo é proposto um *framework* para a caracterização da mobilidade baseada em métricas de mobilidade e grafos de conectividade. Uma avaliação do roteamento em MANETs, sob a influência da mobilidade, também é realizada. Apesar desse artigo ter importantes contribuições para a comunidade científica, os resultados obtidos foram baseados somente em dados sintéticos. Mais

adiante no texto, esse artigo será mais detalhado.

Uma outra classificação proposta por Frank Legendre e outros é apresentada em [57], onde os modelos são classificados em *modelos macroscópicos* e *microscópicos*, ou seja, modelos que possuem uma granularidade-grossa nos detalhes da representação do movimento e modelos que possuem uma granularidade-fina para esses detalhes, respectivamente. Além disso, os autores propõem um modelo de mobilidade baseado em regras comportamentais de como os usuários se movimentam num cenário com obstáculos e resultados bastantes interessantes são obtidos, entretanto, não foi realizada uma validação dos dados gerados por esse modelo com dados reais de movimentação de dispositivos.

No recente trabalho apresentado por Mirco Musolesi e Cecilia Mascolo [58] os modelos de mobilidade são classificados da seguinte maneira: modelos puramente sintéticos (são modelos matemáticos que buscam representar o movimento através somente de equações analíticas) e os modelos baseados em *traces* reais (são modelos construídos com base em *traces* reais de WLANs, da conectividade de dispositivos Bluetooth ou de telefones celulares, da captura do movimento humano através de GPS ou até mesmo a partir do uso da teoria de redes sociais).

Após a descrição das propostas de classificação dos modelos de mobilidade, diversos modelos serão apresentados com base na classificação proposta por Mirco Musolesi e Cecília Mascolo [58] por ser uma classificação baseada na existência de características reais no modelo (modelos baseados em *traces*) ou não (modelos puramente sintéticos).

2.1.1 Modelos Puramente Sintéticos

Na literatura existem diversos modelos sintéticos, sendo os mais utilizados: *random walk* e *waypoint*. O modelo de mobilidade de percurso aleatório (*random walk model*) foi proposto para representar o movimento da matéria e dos seres vivos e foi utilizado em [19, 53, 59] para a avaliação das redes de telefonia celular e das MANETs. Ainda hoje, é um dos modelos mais utilizados pelos pesquisadores para

avaliação de desempenho dos protocolos em MANETs devido à sua simplicidade de implementação e utilização, como pode ser visto em [19, 27]. O seu funcionamento ocorre da seguinte forma: inicialmente o dispositivo é posicionado aleatoriamente na área de simulação, então, é escolhido um ângulo de direção, uniformemente distribuído entre $[0, 2\pi]$ e uma velocidade também uniformemente distribuída entre os valores: velocidade mínima (*vmin*) e velocidade máxima (*vmax*). Escolhido o ângulo de direção e o valor da velocidade, o dispositivo percorre o caminho pela direção escolhida por um período constante de tempo (t). Após passado o período de tempo t, o dispositivo escolherá uma nova direção e uma nova velocidade. Essa rotina se repetirá até o fim da simulação.

Dessa maneira, o modelo aleatório tem a seguinte característica: a direção e a velocidade do movimento, num novo instante de tempo, não tem relação alguma com os valores de instantes anteriores, ou seja, é um modelo de mobilidade sem memória. Por isso, esse modelo pode gerar comportamentos não realísticos, como: mudanças bruscas de direção, paradas abruptas e acelerações bruscas no movimento do dispositivo. Algumas modificações para esse modelo têm sido propostas. Por exemplo, em [60], os dispositivos possuem uma direção aleatória, mas uma velocidade constante durante todo o tempo de simulação. Em [61], os dispositivos percorrem um caminho que é formado de vários segmentos. O tamanho desses segmentos segue uma distribuição exponencial, a direção de cada segmento é escolhida de forma aleatória e a velocidade é uniformemente distribuída entre $[1, n]$.

Um outro modelo que se destaca é o modelo *random waypoint* - RWP, descrito em [19, 62], e que atualmente é o modelo mais utilizado [38, 63]. O RWP divide o percurso de um dispositivo em períodos de movimentação e pausa. O dispositivo fica num local por um determinado intervalo de tempo, denominado de tempo de pausa e depois, move-se para um novo local escolhido aleatoriamente com uma velocidade que segue uma distribuição uniforme entre [*vmin*, *vmax*]. Através da configuração do intervalo do tempo de pausa em zero, esse modelo se comporta de forma semelhante ao modelo de mobilidade de percurso aleatório. Entretanto, esses modelos apresentam características indesejáveis (variações bruscas na velocidade, comportamento zigue-zague na direção do movimento, decaimento na velocidade média e a

distribuição espacial não uniforme dos nós), evidenciando um comportamento não realístico, como mostrado em [23, 37, 64, 65, 66, 67]. No Capítulo 5, algumas dessas características serão comentadas e analisadas.

Como exemplo de outra proposta de modelo individual tem-se o modelo *Smooth random*, proposto em [20], que também é uma extensão do modelo aleatório. Neste modelo, são definidos dois processos de Poisson para permitir a mudança de direção e de velocidade dos dispositivos. A principal contribuição desse modelo é permitir uma mudança suave na velocidade evitando paradas abruptas e acelerações bruscas no movimento, Entretanto, o modelo *smooth* não evita mudanças bruscas de direção.

Uma proposta alternativa para solucionar o problema de mudanças bruscas no movimento é apresentada em [67], onde são utilizadas cadeias de Markov para representar a movimentação dos dispositivos. De acordo com os resultados obtidos em [22, 68, 69], esse modelo gera movimentos mais suaves do que os modelos de mobilidade de percurso aleatório e o *RWP*. Entretanto, esse modelo não representa ambientes com obstáculos ou restrições geográficas. Na Seção 2.2, é apresentada uma modificação neste modelo. Um outro modelo Markoviano, proposto em [70], é uma versão discretizada do processo *Gauss-Markov* para representar a velocidade do movimento. Para mais detalhes sobre esse trabalho, acesse a referência [70].

2.1.2 Modelos Baseados em *Traces*

Recentemente, modelos mais próximos de cenários reais, que levam em consideração a existência de obstáculos, descritos em [57, 71], têm sido propostos. Modelos com características extraídas de cenários reais são apresentados em [32, 72, 73]. Já em [11, 31, 74, 75] têm sido propostos modelos baseados em registros de movimentação de usuários em redes infra-estruturadas (como, por exemplo, WLAN).

Modelos baseados em redes sociais foram apresentados em [57, 76, 77] e em redes complexas [78] para simular o movimento de maneira mais próxima do real sob a hipótese de que as interações sociais dos individuos interferem na mobilidade dos mesmos. Já em [79, 80] são propostos modelos de mobilidade denominados *Levy-*

walk, que são baseados na distribuição Lèvy e foram ajustados através do movimento humano capturado por equipamentos receptores do sistema GPS. Esses modelos serão abordados e investigados mais detalhadamente no Capítulo 5.

2.1.3 *Frameworks* para a representação da mobilidade

Além dos modelos apresentados anteriormente, para representar a mobilidade dos usuários num cenário de MANETs, às vezes, não basta apenas ter um modelo de mobilidade mais adequado, mas sim, um ambiente de representação da movimentação dos dispositivos sem fio. Sendo assim, a seguir, serão apresentadas algumas propostas de representação da movimentação de dispositivos através de *frameworks* de mobilidade.

É apresentado em [20] um mapa conceitual da representação da mobilidade usada na simulação e análise de sistemas de comunicações sem fio. Como pode ser visto na Figura 2.1, a representação da mobilidade é realizada através dos componentes: nível de aleatoriedade (determinística, híbrida ou aleatória), nível de detalhamento (micromobilidade, macromobilidade, movimentação individual ou em grupo), representação por simulação ou por modelagem analítica, quantidade de dimensões da representação (1D, 2D ou 3D) e na escolha da nova direção da abordagem aleatória, pode-se utilizar diferentes regras de borda para a área representada. Essa representação pode ser aplicada tanto nas redes sem infra-estrutura (MANETs), quanto nas redes sem fio infra-estruturadas (rede celular).

Essa proposta caracteriza a mobilidade de uma maneira abrangente e interessante, porém, não são definidas métricas de avaliação da mobilidade ou dos próprios componentes do *framework*, o que dificulta uma avaliação das simulações realizadas seguindo essa modelagem. Entretanto, vale lembrar que essa foi a primeira tentativa de representação da mobilidade através de um *framework* para MANETs.

IMPORTANT é um outro *framework* proposto, em [23], para analisar sistematicamente o impacto da mobilidade no desempenho dos protocolos de roteamento para MANETs. Para isso, foram propostas métricas de mobilidade e de grafos de

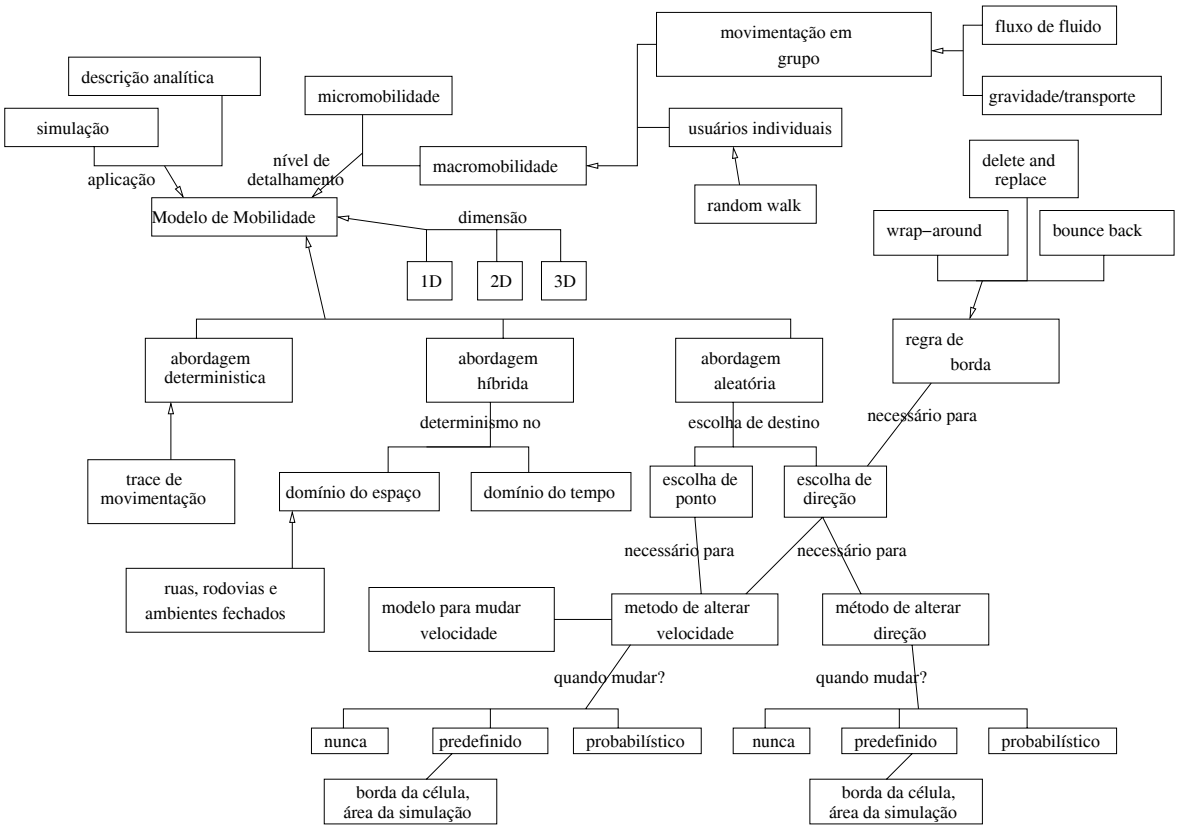


Figura 2.1: Mapa conceitual da representação da mobilidade nas comunicações sem fio.

conectividade, independentes dos protocolos. Esse *framework*, como pode ser visto na Figura 2.2, engloba os seguintes aspectos: modelos de mobilidade, métricas para caracterização da mobilidade e de grafos de conectividade e, ainda, o relacionamento entre a mobilidade e o desempenho do roteamento.

Esse *framework* têm as seguintes características:

- Foco nas características da mobilidade, como: dependência espacial, restrições geográficas e dependência temporal.
- Definição de métricas de conectividade de grafos, estudando a interação das métricas de mobilidade com as métricas de conectividade e o seu efeito no desempenho dos protocolos.
- Análise da razão para as diferenças no desempenho dos protocolos como um

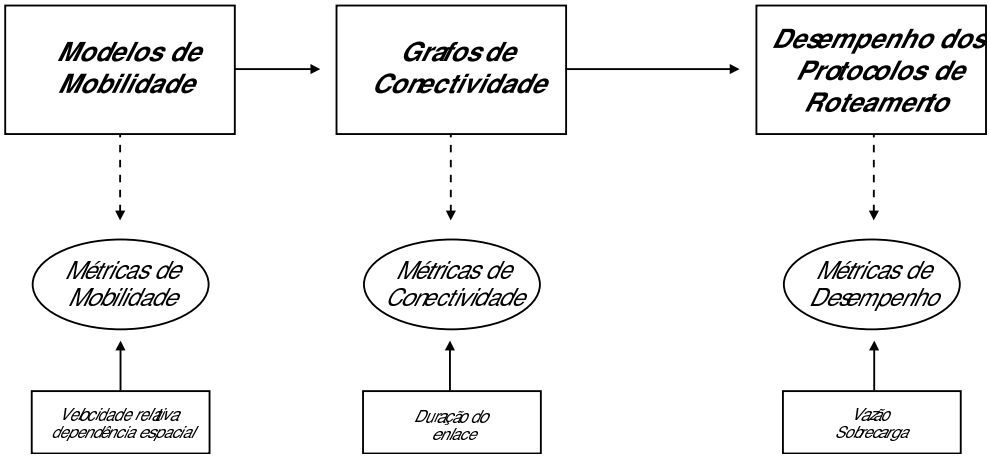


Figura 2.2: *Framework* IMPORTANT

todo através da investigação do efeito da mobilidade nas partes que compõem o protocolo avaliado.

Esse *framework* é uma grande contribuição à área de avaliação dos modelos de mobilidade, pois, ele avalia o impacto desses modelos no desempenho dos protocolos de roteamento. Como dito anteriormente, as métricas propostas para avaliar o comportamento de movimentação e a topologia da rede são totalmente independentes dos protocolos de roteamento, o que permite uma avaliação do comportamento de movimentação dos modelos de mobilidade. As métricas propostas nesse trabalho [23], proporcionaram uma nova fase na avaliação de desempenho de protocolos de roteamento para MANETs, visto que a maioria das pesquisas não tinham o compromisso de representar características da mobilidade aproximadas de um cenário real. Entretanto, nesse trabalho foi utilizada apenas mobilidade artificial, ou seja, movimentação gerada através de modelos de mobilidade. Assim sendo, esse trabalho será utilizado como base para a nova proposta de caracterização da mobilidade que será apresentada no Capítulo 3 e que irá utilizar dados reais de movimentação de dispositivos sem fio.

Recentemente, um *framework* foi proposto, por Agoston e outros [81], para simular modelos de mobilidade em DTN no simulador OMNeT++ e alguns resultados interessantes sobre a duração do contato entre os nós e da influência desses contatos

no funcionamento das DTNs são apresentados.

2.1.4 Discussão

Fazendo uma análise comparativa dos trabalhos apresentados nesta seção, todos possibilitam muitas contribuições à área de representação e avaliação da mobilidade. Entretanto, os cenários de uso das MANETs podem ser muito genéricos, abrangentes ou ainda, específicos para um determinado contexto. Assim, representar a movimentação de dispositivos sem fio em todos esses possíveis cenários, não é uma tarefa simples e, dessa forma as contribuições desses trabalhos são específicas. Além disso, como não se tem muitos trabalhos de validação do nível de proximidade entre os modelos ou dos *frameworks* de mobilidade com a movimentação real de dispositivos sem fio, é necessário verificar essa proximidade visto que, em muitos trabalhos foi constatado uma influência da mobilidade na avaliação do desempenho de protocolos e aplicações das MANETs. Essa validação será possível a partir da nova proposta de caracterização da mobilidade apresentada no Capítulo 3.

2.2 Uma Melhoria no Modelo Markoviano de Mobilidade Individual Genérico (MMIG)

Com o objetivo de evitar mudanças bruscas na direção do movimento dos nós móveis, inicialmente propusemos o modelo MMIG em [67]; e realizamos algumas avaliações como pode ser visto em [22, 68, 69]. Entretanto, a representação matemática da probabilidade de transição entres os estados da cadeia de Markov deste modelo poderia ser simplificada. Além disso, foi identificado em [82] que o modelo MMIG possuía a característica de concentração dos nós, nas bordas da área de simulação. Isso foi observado através de uma análise da distribuição espacial dos nós e descobrimos que essa característica foi causada pela maneira como a regra de borda foi implementada no gerador de mobilidade. Diante disto, o nosso modelo MMIG foi aprimorado e a sua implementação foi refeita.

Nesta seção, será apresentada a descrição detalhada do modelo MMIG, bem como uma simplificação na sua representação analítica com o objetivo de torná-la mais simples e de fácil implementação.

O MMIG é baseado no modelo de mobilidade proposto por Chiang [83] e contém duas cadeias de Markov com parâmetro discreto para representar o movimento nas direções x e y, sendo que a mudança nas coordenadas x e y do movimento acontece de maneira independente. O espaço de estados (S) das cadeias é dado por $S = \{-e, -e+1, \ldots, -1, 0, 1, \ldots, e-1, e\}$. Aqui, os estados $k \neq 0$ correspondem a mudanças a partir da posição atual X (ou Y) para a próxima posição X' (ou Y'); e o estado $k = 0$ representa repouso (nenhuma mudança) na coordenada correspondente (i.e., $X = X'$ e/ou $Y = Y'$). Além disso, na definição dada acima, o estado representado por e corresponde ao valor absoluto da mudança máxima na posição, permitida em cada direção x e y no movimento do nó. Assim, considerando o fato de que o valor absoluto do incremento na posição está compreendido no intervalo $[1, \Delta_{max}]$, os estados (e) e $(-e)$ correspondem ao deslocamento máximo a partir da posição atual em X (ou em Y) para a próxima posição $X' = X \pm \Delta_{max}$ (ou $Y' = Y \pm \Delta_{max}$).

Deve ser enfatizado ainda, que os estados das cadeias de Markov, definidas acima, representam *mudanças nas posições* (para cada coordenada, x e y), e não as próprias posições.

Neste modelo, o valor absoluto da variação da velocidade é dada por uma variável aleatória geométrica truncada, distribuída entre 1 e b^{e-1}, onde $b > 1$ e $b \in \mathbb{R}$, e é a base do número que representa o incremento nas posições ($X \rightarrow X'$, ou $Y \rightarrow Y'$).

Assim, pelas definições dadas acima, tem-se:

$$\Delta_{max} = b^{e-1}, \quad \text{para} \quad e > 0 \tag{2.1}$$

Além disso, a correspondência dos estados nas cadeias de Markov (para as direções x e y) com as mudanças na posições (vide Figura 2.3) permite obter a próxima posição do nó móvel da seguinte maneira:

$$X' = X + s.b^{\alpha}; \quad \text{para} \quad 0 \leq \alpha \leq e-1; \tag{2.2}$$

$$Y' = Y + s.b^{\alpha}; \quad \text{para} \quad 0 \leq \alpha \leq e-1; \tag{2.3}$$

onde, $s \in \{-1, 0, 1\}$ e é utilizada para representar o sentido do movimento (-1 para direção contrária a atual, 0 para não mudar a posição atual, e 1 para a mesma direção) e o parâmetro α como sendo um número inteiro contido no intervalo entre $[0, e-1]$.

No sentido de computar as probabilidades de transição entre os estados, mostradas no diagrama de transição de estados da Figura 2.3, será definida $p_{k,j}$ como sendo a probabilidade de ir para o estado (j) no próximo intervalo de tempo, dado que ele está atualmente no estado (k);

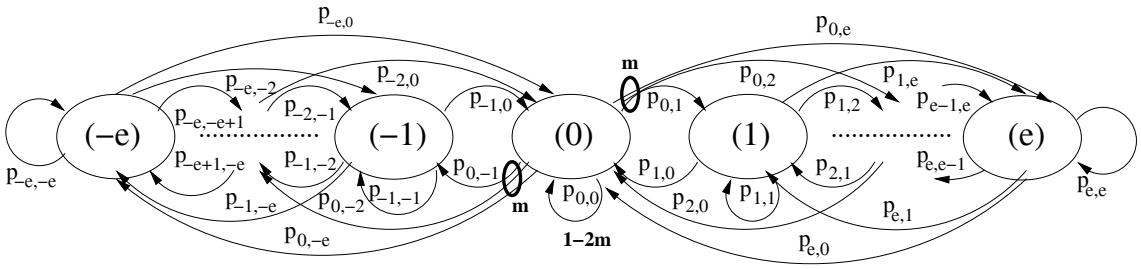


Figura 2.3: Diagrama de transição de estados da cadeia de Markov para representar o movimento, nas direções x e y, do modelo MMIG.

Assim, a seguir, será apresentada a forma de como obter as probabilidades de transição para a cadeia de Markov mostrada na Figura 2.3.

Olhando para cada estado da cadeia, com exceção dos estados (e) e $(-e)$, tem-se:

- m é o valor da soma de todas as probabilidades, para qualquer estado à direita do estado atual, seguindo as regras do diagrama de transição de estados ilustradas na Figura 2.3. Esta soma é dada por uma série geométrica finita com razão $\frac{1}{2}$. Este valor é definido na Equação 2.4 para o estado (0) e também para os estados positivos; e na Equação 2.5 para os estados negativos;

- A soma de todas as probabilidades de transição para qualquer estado à esquerda do estado atual é também igual a m, obedecendo as regras mostradas na Figura2.3 . Este valor é definido na Equação 2.6 para o estado (0) e também para os estados negativos; e na Equação 2.7 para os estados positivos.

- Para permanecer no estado atual o valor é igual a $(1-2m)$, como definido na Equação 2.8;

$$\sum_{j=k+1}^{e} p_{k,j} = m; \quad \text{para} \quad 0 \leq k < e \tag{2.4}$$

$$\sum_{j=k+1}^{0} p_{k,j} = m; \quad \text{para} \quad -e \leq k < 0 \tag{2.5}$$

$$\sum_{j=k-1}^{-e} p_{k,j} = m; \quad \text{para} \quad -e < k \leq 0 \tag{2.6}$$

$$\sum_{j=k-1}^{0} p_{k,j} = m; \quad \text{para} \quad 0 < k \leq e \tag{2.7}$$

$$p_{k,k} = 1-2m; \quad \text{para} \quad -e < k < e \tag{2.8}$$

Diferentemente dos outros estados, $(-e)$ e (e) são os extremos da cadeia de Markov como mostrado na Figura 2.3. O estado $(-e)$ possui transições somente para outros estados à sua direita até o estado (0), na qual o valor da soma de todas as possíveis probabilidades é igual a m, como definido na Equação 2.5; ou para si próprio com a probabilidade de $1-m$, definida na Equação 2.9. De maneira simétrica, o estado (e) possui transições somente para outros estados à sua esquerda,

na qual o valor da soma de todas as possíveis probabilidades até o estado (0) é também igual a m e definido na Equação 2.6; ou para si próprio com a probabilidade de $1 - m$, definida na Equação 2.9.

$$p_{e,e} = p_{-e,-e} = 1 - m; \tag{2.9}$$

A partir das suposições do modelo e da manipulação algébrica das Equações 2.4 - 2.9, tem-se a fórmula geral para $p_{k,j}$ em função somente da probabilidade m e dos próprios estados $k, j, e, -e$ da cadeia:

$$\begin{aligned}
&p_{k,j} = \frac{m2^{(|k|-|j|)}}{1-2^{(|k|-|e|)}}; \quad \text{com} \quad (0 \leq k < e, \quad k < j \leq e) \\
&\text{ou} \quad (-e < k \leq 0, \quad -e \leq j < k), \quad \text{e} \\
&p_{k,j} = \frac{m2^{-(|k|-|j|)}}{1-2^{(-|k|)}}; \quad \text{com} \quad (-e \leq k < 0, \quad k < j \leq 0) \\
&\text{ou} \quad (0 < k \leq e, \quad 0 \leq j < k).
\end{aligned} \tag{2.10}$$

As seguintes características podem ser evidenciadas no modelo MMIG:

- A velocidade aumenta exponencialmente até o valor Δ_{max}, entretanto, a probabilidade de ocorrer uma velocidade decresce obedecendo uma distribuição geométrica truncada. Assim, velocidades pequenas têm maior probabilidade de ocorrer do que velocidades grandes, evitando assim, mudanças bruscas nesse componente do movimento gerado pelo modelo;

- Uma vez num estado ($k \rightarrow positivo$), não é possível mudar para um estado ($k \rightarrow negativo$) sem passar pelo estado (0) e vice-versa. Deste modo, o nosso modelo MMIG evita mudanças bruscas na direção do movimento.

Além disso, o modelo MMIG pode representar movimentos cujo incremento na posição é gerado por valores entre $[1, \Delta_{max}]$ com base numa cadeia de Markov para as coordenadas x e y. Desta maneira, este modelo é de uso geral e permite a

representação de diversos tipos de movimento, bastando apenas um ajuste no valor de cada parâmetro do modelo. Entretanto, o ajuste dos parâmetros do modelo depende da experiência do pesquisador no uso do MMIG, sendo que no Capítulo 5 é apresentada uma técnica de ajuste dos modelos de mobilidade que pode facilitar esta tarefa. Além disso, o modelo MMIG não aborda a influência de obstáculos físicos na área de simulação.

No Capítulo 5, uma avaliação do nosso modelo MMIG e de outros modelos de mobilidade será apresentada, na qual o valor dos parâmetros desses modelos foram ajustados de acordo com as características da mobilidade humana, capturada em um cenário real. Além disso, vários resultados interessantes serão apresentados e discutidos.

2.3 Considerações Finais

Como foi apresentado ao longo desse capítulo, poucos trabalhos sobre mobilidade têm sido realizados com o objetivo de capturar a movimentação real dos dispositivos de redes móveis sem fio, ao invés dos trabalhos que analisam a mobilidade através de mineração de dados nos *traces* da associação de dispositivos sem fio em pontos de acesso de WLANs. Isso é importante para uma investigação dos componentes do movimento real e para permitir uma validação do nível de realismo dos modelos de mobilidade em relação a esse movimento real. A tarefa de investigação dos componentes do movimento real ainda está em aberto e tem sido discutida pela comunidade científica, como por exemplo no *workshop* CRAWDAD[1] que aconteceu nas edições de 2005, 2006 e 2007 da conferência MOBICOM promovida pela ACM. Sendo assim, no próximo capítulo apresentaremos uma nova proposta de caracterização do movimento para uma investigação da mobilidade dos usuários em redes móveis sem fio.

[1]Este *workshop* vem sendo promovido pelos participantes do projeto de captura de dados em redes sem fio, denominado CRAWDAD [45] e que é liderado pelo professor David Kotz da Dartmouth College.

Capítulo 3

Proposta de Caracterização da Mobilidade de Dispositivos Sem Fio

NESTE capítulo é apresentada uma nova proposta de caracterização da mobilidade dos dispositivos sem fio baseada em *traces* de movimentação real e em uma análise qualitativa e quantitativa da mobilidade para as redes móveis sem fio. Além disso, será apresentada uma metodologia de coleta, tratamento e análise dos dados para essa caracterização. Assim, nas seções seguintes, serão descritos a motivação e os trabalhos relacionados, uma visão geral sobre essa caracterização, a descrição da análise da mobilidade e o detalhamento da metodologia proposta para o tratamentos dos dados dessa caracterização.

3.1 Motivação e Trabalhos Relacionados

Como descrito no Capítulo 1, a técnica de simulação é muito utilizada na avaliação de desempenho de sistemas computacionais e, principalmente, na avaliação das MANETs. Dentro desse contexto, a avaliação de desempenho em MANETs, através de simulação, deve levar em consideração as características dos cenários avaliados, o funcionamento dos protocolos da rede e os fatores pertinentes às aplicações utilizadas pelos usuários. Algumas dessas características e/ou fatores são:

- o tipo ou comportamento da propagação do sinal de rádio dos dispositivos no cenário [84, 85];
- o tipo ou comportamento da movimentação dos dispositivos, utilizados pelos usuários, no cenário [20, 19, 22];
- o tipo ou comportamento do tráfego de dados transmitido pelos dispositivos na rede [41].

Sendo assim, para representar essas características e/ou fatores, através da técnica de simulação, são utilizados os seguintes modelos: modelos de propagação de sinal (que representam as características da propagação do sinal eletromagnético dentro do cenário físico), modelos de mobilidade (buscam representar o comportamento de movimentação dos usuários) e os modelos de tráfego (que representam as características do tráfego transmitido por uma aplicação na rede de comunicação), respectivamente. Entretanto, cuidados devem ser tomados, como pode ser visto em [27, 28, 37, 38, 39, 40, 86], para que a avaliação de desempenho através da técnica de simulação não gere resultados incorretos evitando assim, interpretações erradas em relação ao contexto avaliado.

Numa outra direção, trabalhos para a avaliação das redes sem fio de maneira adequada a cenários reais estão sendo realizados. Em [85] são realizados estudos sobre o impacto da camada física no desempenho das redes sem fio. Em [29] é realizado um *testbed* em MANETs com o objetivo de validar avaliações feitas por simulação com dados reais. Uma visão geral sobre implementações reais de protocolos para as MANETs é apresentada em [30]. Caracterizações de dados em outras redes, como em redes *mesh* [87, 88, 89], redes domiciliares [90] e DTN [33, 34, 35, 91, 92], também estão sendo realizadas. Esses métodos de obtenção de dados, por medição, estão cada vez mais sendo usados pela comunidade científica para avaliação de redes sem fio. Dessa forma, esses trabalhos também contribuíram como motivação para a elaboração da proposta de caracterização da mobilidade, que será apresentada a seguir.

3.2 Visão Geral da Proposta

A representação hipotética do movimento dos dispositivos na simulação de uma rede móvel sem fio, normalmente, é realizada através de modelos de mobilidade que, como descrito no Capítulo 2, possuem simplificações na representação do movimento ou características que tornam esses modelos não realistas. Dessa forma, uma solução seria a utilização de modelos realistas, mas para isso é necessário a obtenção das características da movimentação dos dispositivos sem fio em um cenário real. Entretanto, poucos trabalhos disponíveis na literatura têm sido feitos nesse sentido para as redes móveis sem infra-estrutura. Além disso, quando se tem dados reais, através de medição, a obtenção de informações sobre o movimento dos usuários é complexa e difícil de ser reproduzida e, até mesmo comparada com os modelos de mobilidade, como descrito em [74].

Dentro desse contexto, neste capítulo, será proposta uma maneira de se caracterizar o movimento dos dispositivos através de uma análise qualitativa e quantitativa dos componentes existentes nesse movimento capturado através de *traces* em cenários reais. Além disso, será apresentada uma metodologia para a realização dessa caracterização. Essa metodologia consiste em descrever as tarefas de captura e tratamento de dados do movimento real dos dispositivos, de uma análise estatística dos componentes deste movimento e a extração de informações sobre a mobilidade investigada. Essa proposta utilizou como referência o mapa conceitual proposto por Bettstetter [20], ilustrado na Figura 2.1, e teve como foco um alto nível de detalhamento dos dados analisados para identificar o nível de aleatoriedade dos componentes do movimento (velocidade e direção). Versões preliminares desta caracterização são apresentadas em [47, 48]. A seguir, serão descritas essa análise e a metodologia proposta para essa caracterização.

3.3 Análise Espaço-Temporal da Mobilidade

Esta análise consiste na investigação dos componentes do movimento dos dispo-

sitivos sem fio e na relação de dependência entre esses componentes em um determinado intervalo de tempo. Essa análise temporal será realizada em relação ao espaço físico na qual os dispositivos estão inseridos. Desse modo, ela refere-se a uma investigação do deslocamento espacial dos dispositivos, ou seja, está relacionada com as informações da posição de um dispositivo móvel num sistema de coordenadas (métrico, latitude/longitude) em relação a um instante de tempo (t_j). A variação desta posição relativa, em um intervalo de tempo, permitirá a observação do valor dos seguintes componentes do movimento: velocidade, aceleração, ângulo de mudança de direção; e ainda de algumas medidas de interesse que serão definidas ao longo desta seção.

3.3.1 Definição dos Componentes do Movimento

A partir do valor desses componentes e medidas, a análise espaço-temporal terá como objetivo identificar as características do movimento dos dispositivos em cenários específicos. Feito isso, essas informações poderão possibilitar o desenvolvimento de modelos de mobilidade mais realistas. Assim, os componentes e as medidas de interesse do movimento utilizadas nessa análise serão definidas a seguir.

Seja $\vec{P}_i(t_j)$ o vetor que representa a posição do i-ésimo dispositivo, no instante t_j, para $j = 1, 2, 3, \ldots, T-1, T$; e $t_{j+1} = t_j + \delta$; onde $\delta = 1$ segundo. Caso seja necessário aumentar ou diminuir este intervalo de tempo, ou seja, a granularidade do tempo, basta alterar o valor de δ.

Definindo por $x_i(t_j)$ e $y_i(t_j)$ os componentes de $\vec{P}_i(t_j)$ nas direções $\vec{x}$ e $\vec{y}$, respectivamente, no instante t_j, pode-se escrever:

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

onde $x_i(t_j)$ e $y_i(t_j)$ são números reais e a unidade de medida de $\vec{P}_i(t_j)$ e de seus componentes é dada em metros (m) quando o movimento for de pedestres ou em quilômetros (km), quando o movimento analisado for de veículos. Para a análise de

um movimento contendo três dimensões, pode-se usar a dimensão $z_i t_j$ para representar a direção $\vec{z}$ desse movimento.

Ângulo de mudança de direção do movimento - $\alpha_i(t_j)$: é definido como sendo o ângulo de mudança de direção da movimentação do i - ésimo dispositivo no instante de tempo (t_j), dado que no instante (t_{j-1}), o dispositivo estava na posição $\vec{P}_i(t_{j-1})$. Esse ângulo é calculado pela aplicação da *Lei dos Cossenos*, e essa aplicação pode ser verificada através da relação entre os componentes geométricos ilustrados na Figura 3.1.

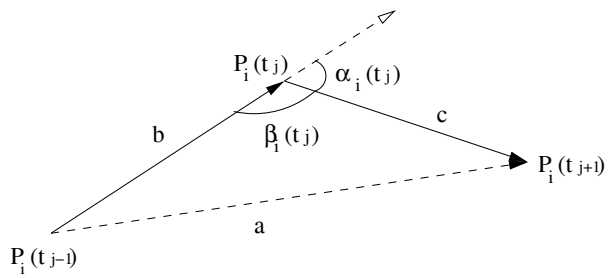


Figura 3.1: Componentes geométricos de um movimento qualquer.

Nessa figura, as variáveis a, b e c assumem o valor do módulo do vetor diferença das posições do i-ésimo dispositivo no tempo. Assim, $a = |\vec{P}_i(t_{j+1}) - \vec{P}_i(t_{j-1})|$, $b = |\vec{P}_i(t_j) - \vec{P}_i(t_{j-1})|$ e $c = |\vec{P}_i(t_{j+1}) - \vec{P}_i(t_j)|$, respectivamente e $\beta_i(t_j)$ é o ângulo oposto ao vetor diferença $\vec{P}_i(t_{j+1}) - \vec{P}_i(t_{j-1})$

Assim, $\beta_i(t_j)$ é descrito da seguinte maneira:

$$\beta_i(t_j) = \arccos\left(\frac{b^2 + c^2 - a^2}{2bc}\right), \quad \text{para} \quad b \quad \text{e} \quad c \neq 0; \tag{3.2}$$

onde a unidade de medida de $\beta_i(t_j)$ é dada em graus (°). Como $\alpha_i(t_j)$ é um ângulo complementar de $\beta_i(t_j)$ (vide Figura 3.1), então $\alpha_i(t_j) = 180 - \beta_i(t_j)$.

Velocidade do dispositivo - $V_i(t_j)$: é a velocidade escalar do i - ésimo dispositivo no instante de tempo (t_j) e é calculada por:

$$V_i(t_j) = \frac{\sqrt{(P_{i_x}(t_j) - P_{i_x}(t_{j-1}))^2 + (P_{i_y}(t_j) - P_{i_y}(t_{j-1}))^2}}{t_j - t_{j-1}} \tag{3.3}$$

onde a unidade de medida de $V_i(t_j)$ é dada em metros por segundo (m/s) quando o movimento for de pedestres ou quilômetros por hora (km/h) quando o movimento analisado for de veículos.

Além da observação dos valores de cada componente do movimento, é possível verificar o comportamento da variação desses valores em relação ao tempo, ou seja, a variação da velocidade que é a própria aceleração do movimento, e a variação do ângulo de mudança de direção em relação ao instante de tempo (t_j). Assim, essas medidas serão definidas a seguir.

Aceleração - $A_i(t_j)$: é a taxa de variação da velocidade e pode ser definida como sendo a mudança no valor da velocidade escalar do i - ésimo dispositivo no instante t_j em relação ao instante anterior t_{j-1}. Assim, essa aceleração é dada por:

$$A_i(t_j) = \frac{\Delta V_i(t_j)}{\Delta t_j} = \frac{V_i(t_j) - V_i(t_{j-1})}{t_j - t_{j-1}} \tag{3.4}$$

Variação do ângulo de mudança de direção - $\Delta\alpha_i(t_j)$: é a mudança no valor do ângulo da direção do i - ésimo dispositivo no instante t_j em relação ao instante anterior t_{j-1}. De acordo com a definição, $\Delta\alpha_i(t_j)$ é descrita da seguinte maneira:

$$\Delta\alpha_i(t_j) = \alpha_i(t_j) - \alpha_i(t_{j-1}) \tag{3.5}$$

Nessa caracterização, os valores positivos e negativos assumidos por $\Delta\alpha_i(t_j)$ serão analisados conjuntamente. Com isso, será usado somente o módulo dessa medida nesta análise.

3.3.2 Identificação das Mudanças Bruscas no Movimento

Caso o valor do módulo das variações na velocidade e no ângulo de mudança de direção seja muito grande, isso poderá provocar modificações bruscas no movimento dos dispositivos sem fio e, portanto, essas variações também serão alvo

de investigação desta análise espaço-temporal. Sendo assim, serão definidas as seguintes medidas de interesse: acelerações bruscas, tempo de pausa no movimento e variações abruptas no ângulo de mudança de direção.

Aceleração brusca - $Ab_i(t_j)$: é definida como sendo uma variação acentuada no valor da velocidade escalar do i - ésimo dispositivo, entre dois instantes de tempo consecutivos, ou seja, é quando o módulo da variação da velocidade $A_i(t_j)$ for maior que um limiar. Assim, será utilizado γ para representar esse limiar, isto é, o valor que limita superiormente o conjunto de valores aceitáveis para a variação suave da velocidade de um dispositivo qualquer. Esse limiar é parametrizável de acordo com o tipo de usuário observado. Por exemplo, pode-se usar o desvio-padrão de uma medida para ser este limiar. Dessa maneira, caso o valor do módulo de $A_i(t_j)$ seja maior que γ, então $A_i(t_j)$ é considerada uma aceleração brusca e, portanto, $Ab_i(t_j) = 1$, senão $Ab_i(t_j) = 0$. Deste modo, $Ab_i(t_j)$ é dada por:

$$Ab_i(t_j) = \begin{cases} 1, & \text{se } |A_i(t_j)| > \gamma \\ 0, & \text{se } |A_i(t_j)| \leq \gamma \end{cases} \tag{3.6}$$

onde, $A_i(t_j) > 0$.

Número de acelerações bruscas - Nab_i: é a variável aleatória (v.a.) que representa a quantidade de vezes que a variação da velocidade do i - ésimo dispositivo, no intervalo de tempo $\{t_1, t_T\}$, foi maior que o limiar γ. Assim tem-se:

$$Nab_i = \sum_{j=1}^{T} Ab_i(t_j) \tag{3.7}$$

Número total de acelerações bruscas - Nab: é a v.a. que representa a quantidade total de mudanças bruscas observadas no movimento de todos os dispositivos analisados num determinado cenário. Essa v.a. é dada a seguir:

$$Nab = \sum_{i=1}^{n} Nab_i \tag{3.8}$$

onde n representa o número total de dispositivos sem fio do conjunto analisado.

Tempo de pausa - $Tp_i(t_j)$**:** é dado pelo intervalo de instantes consecutivos de tempo em que o i - ésimo dispositivo permanece parado a partir do instante t_j até o instante t_k, ou seja, a posição $P_i(t_j)$ é igual a $P_i(t_k)$, onde $j < k \leq T$. Logo, $Tp_i(t_j)$ é dado por:

$$Tp_i(t_j) = t_k - t_j, \quad \text{se} \quad P_i(t_j) = P_i(t_k) \quad \text{e} \quad P_i(t_k) \neq P_i(t_{k+1}) \tag{3.9}$$

Pausa no movimento - $p_i(t_j)$**:** representa a ocorrência de paradas no movimento do i - ésimo dispositivo no instante t_j, para j variando de 1 a T. Dessa forma, $p_i(t_j)$ assumirá o valor (um), se $Tp_i(t_j)$ for diferente de zero ou assumirá o valor (zero) caso contrário, como pode ser visto a seguir:

$$p_i(t_j) = \begin{cases} 1, & \text{se } Tp_i(t_j) \neq 0 \\ 0, & \text{se } Tp_i(t_j) = 0 \end{cases} \tag{3.10}$$

Número de pausas no movimento - Np_i**:** é a v.a. que representa a quantidade de ocorrências de pausas no movimento do dispositivo i durante o intervalo de tempo $\{t_1, t_T\}$. Uma pausa pode ocorrer quando o valor da velocidade do dispositivo for igual a zero. Essa medida é definida da seguinte maneira:

$$Np_i = \sum_{j=1}^{T} p_i(t_j) \tag{3.11}$$

Número total de pausas no movimento - Np**:** é a v.a. que representa o número de todas as pausas no movimento de todos os dispositivos observados num cenário específico. Essa v.a. é dada por:

$$Np = \sum_{i=1}^{n} Np_i \tag{3.12}$$

Mudança brusca de direção - $Mb\alpha_i(t_j)$**:** é quando o módulo da variação do ângulo de mudança de direção do i - ésimo dispositivo, no tempo t_j, for maior que o limiar ζ, que também é parametrizável de acordo com o tipo de usuário observado.

Dessa forma, $Mb\alpha_i(t_j)$ recebe o valor (um), se $|\Delta\alpha_i(t_j)| > \zeta$ ou $Mb\alpha_i(t_j)$ recebe o valor (zero), se $|\Delta\alpha_i(t_j)| \leq \zeta$. Assim, $Mb\alpha_i(t_j)$ é descrita da seguinte maneira:

$$Mb\alpha_i(t_j) = \begin{cases} 1, & \text{se } |\Delta\alpha_i(t_j)| > \zeta \\ 0, & \text{se } |\Delta\alpha_i(t_j)| \leq \zeta \end{cases} \tag{3.13}$$

Número de mudanças bruscas de direção - $Nmb\alpha_i$**:** é a v.a. que representa a quantidade de ocorrências de $Mb\alpha_i(t_j)$, na qual $|\Delta\alpha_i(t_j)| > \zeta$ e é dada pela equação:

$$Nmb\alpha_i = \sum_{j=1}^{T} Mb\alpha_i(t_j) \tag{3.14}$$

Número total de mudanças bruscas de direção - $Nmb\alpha$**:** é a v.a. que representa a quantidade total de mudanças bruscas de direção de todos os dispositivos analisados em um cenário específico. Essa v.a. é dada na equação abaixo:

$$Nmb\alpha = \sum_{i=1}^{n} Nmb\alpha_i \tag{3.15}$$

Autocorrelação: é a 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. Supondo que uma variável aleatória $X(t)$, dependente do tempo t e com média μ; sua autocorrelação é definida da seguinte maneira:

$$R(k) = \frac{E[(X_t - \mu)(X_{t+k} - \mu)]}{\sigma^2}, \tag{3.16}$$

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

Após a definição de todas essas medidas de interesse, que servirão para quantificar o valor dos componentes do movimento de dispositivos serão definidas agora, a média amostral do ângulo de mudança de direção, da velocidade, da aceleração e do tempo de pausa, com base nas equações (3.2), (3.3), (3.4) e (3.12), respectivamente.

Média amostral do ângulo de mudança de direção - $\langle \alpha_i \rangle$: é definida pela soma dos ângulos de mudança de direção do i - ésimo dispositivo durante o intervalo de tempo $\{t_1, t_T\}$, dividido pela quantidade de amostras desses ângulos computadas. Sendo assim, essa medida é descrita abaixo:

$$\langle \alpha_i \rangle = \frac{1}{T} \sum_{j=1}^{T} \alpha_i(t_j) \tag{3.17}$$

Velocidade média amostral - $\langle V_i \rangle$: é dada pela soma das velocidades do i - ésimo dispositivo durante o intervalo de tempo $\{t_1, t_T\}$, dividido pela quantidade de amostras da velocidade, então a cardinalidade do conjunto das amostras é a própria cardinalidade do intervalo de tempo $\{t_1, t_T\}$. Assim, essa medida é descrita na equação a seguir.

$$\langle V_i \rangle = \frac{1}{T} \sum_{j=1}^{T} V_i(t_j) \tag{3.18}$$

Aceleração média amostral - $\langle A_i \rangle$: é definida pela soma de todas as variações da velocidade do i - ésimo dispositivo durante o intervalo de tempo $\{t_1, t_T\}$, dividido pela quantidade de amostras computadas. Essa medida é dada a seguir.

$$\langle A_i \rangle = \frac{1}{T} \sum_{j=1}^{T} A_i(t_j) \tag{3.19}$$

Média amostral do tempo de pausa- $\langle Tp_i \rangle$: é a soma de todos os tempos de pausa ocorridos no movimento do i - ésimo dispositivo durante o intervalo $\{t_1, t_T\}$, dividido pela quantidade das ocorrências desses tempos de pausa Np_i. Sendo assim, têm-se:

$$\langle Tp_i \rangle = \frac{1}{Np_i} \sum_{j=1}^{Np_i} Tp_i(t_j) \tag{3.20}$$

Após a descrição das medidas utilizadas na análise da mobilidade de dispositivos sem fio, na próxima seção, apresentaremos a metodologia de coleta e tratamento dos dados a serem caracterizados.

3.4 Uma Metodologia Proposta para a Caracterização da Mobilidade

Para que a análise da mobilidade, apresentada anteriormente, seja aplicada em registros de movimentação de maneira precisa, propusemos uma metodologia de manipulação dos dados a serem analisados.

Esta metodologia será composta por tarefas organizadas em etapas de desenvolvimento. Essas tarefas possuem uma alta dependência em relação as tarefas anteriores. Com isso, a execução cronológica dessas tarefas será primordial para a eficácia da caracterização. 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, que serão descritas detalhadamente a seguir, são: definição dos cenários de observação, captura e processamento dos dados, análise estatística dos dados, identificação de padrões de comportamento e visualização dos resultados encontrados. A Figura 3.2 ilustra estas etapas e o relacionamento entre as mesmas.

3.4.1 Definição dos Cenários de Observação

A nossa metodologia é de uso geral e de grande abrangência, podendo assim ser utilizada em todas as infra-estruturas de redes móveis sem fio. Entretanto, como algumas tecnologias se aplicam a cenários específicos ou são usadas em algumas situações, devemos obter todas as informações intrínsecas a esta situação ou cenário de uso real.

Sendo assim, na etapa de definição do cenário a ser observado, deve ser levado em consideração os seguintes parâmetros: o tipo de cenário, o tamanho da área em que se encontra o cenário, a quantidade de tempo na qual o cenário será observado, os tipos de dispositivos existentes (*laptop, palmtop, smartphone*, telefone celular, sensores, etc), a quantidade de cada tipo de dispositivo e o número de pontos de acesso, se o cenário observado for em redes infra-estruturadas.

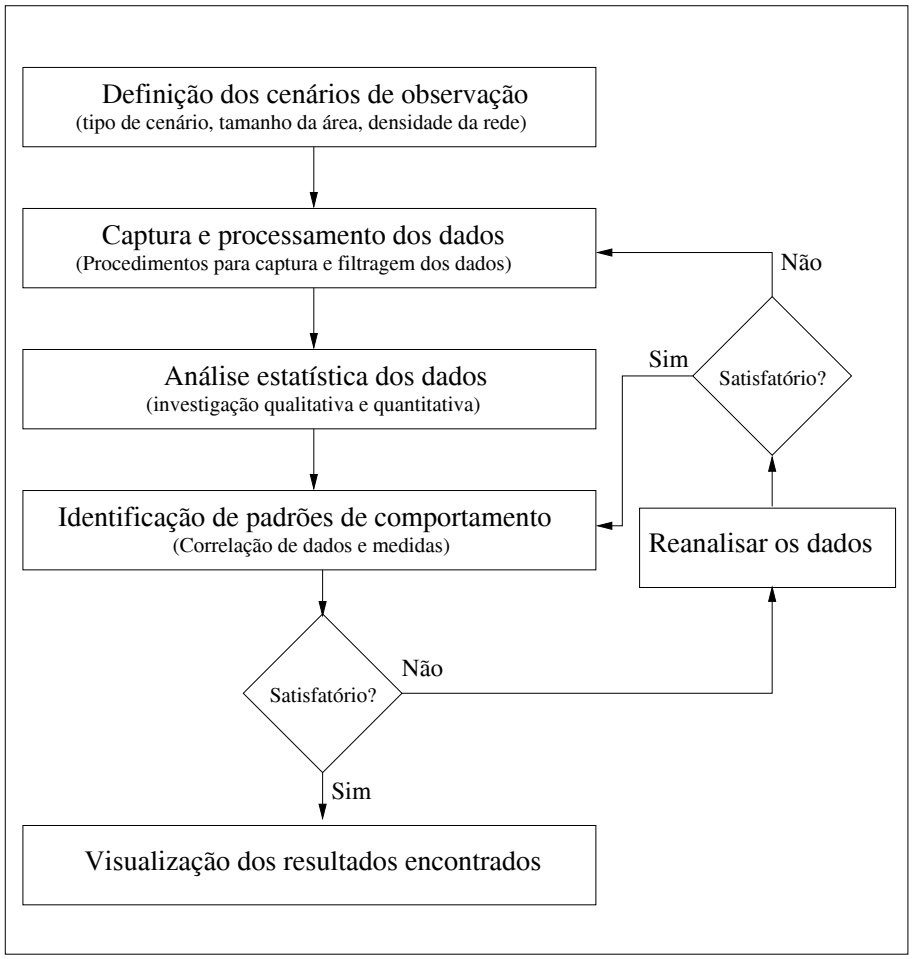


Figura 3.2: Etapas da metodologia proposta

Como exemplos de cenários ou situações de uso de redes (móveis) sem fio e as possíveis tecnologias que podem ser utilizadas em cada cenário, tem-se a Tabela 3.1.

Como descrito nesta tabela, diversos tipos de cenários podem ser utilizados e analisados. Sendo assim, o importante dessa etapa é especificar todas as características do cenário a ser observado, que serão levadas em conta nas análises da caracterização da mobilidade que se deseja fazer e esses dados sobre o cenário poderão ser utilizados na configuração dos modelos de mobilidades para os cenários em questão. A seguir, a etapa de captura e processamento dos dados será descrita.

Tabela 3.1: Exemplos de situações ou cenários de uso de redes (móveis) sem fio.

Cenários Reais	**Tecnologias de redes móveis sem fio**
Pedestres num centro urbano	Ad Hoc, Celular, 802.11, 802.16, Mesh, DTN
Veículos num centro urbano	Ad Hoc, Celular, 802.11, 802.16, Mesh, DTN
Tráfego de veículos numa rodovia	Ad Hoc, Celular, 802.16, Mesh
Operações de busca e salvamento	Ad Hoc, Celular, 802.11, 802.16, Mesh
Uso em áreas rurais	Ad Hoc, Celular, 802.11, 802.16, Mesh, DTN
Aplicações militares	Ad Hoc, Celular, 802.11, 802.16, Mesh
Pessoas dentro de prédios	Ad Hoc, Celular, 802.11, 802.16, Mesh

3.4.2 Captura e Processamento dos Dados

Após a definição do cenário, é importante definir os procedimentos de captura e tratamento dos dados para evitar possíveis erros na análise. Para isso, devem ser escolhidas amostras de mobilidade independentes, ou seja, cada amostra deve ser de um usuário distinto.

Para a obtenção dos dados de posicionamento dos usuários ao longo do tempo, foi identificada a necessidade de se utilizar um sistema de localização [14]. Um dos sistemas mais conhecidos e utilizados para isso é o Sistema de Posicionamento Global (*Global Positioning System* - GPS), que permite a captura da posição real do dispositivo num cenário específico [93]. Entretanto, como o sistema de GPS está imerso na atmosfera do planeta Terra e utiliza ondas eletromagnéticas para a transmissão dos dados necessários ao seu funcionamento, ele está sujeito a inconformidades no ajuste dos parâmetros que compõem o cálculo da posição do dispositivo. Assim, erros podem ocorrer no cálculo do posicionamento do dispositivo a ser localizado [93].

Dentro desse contexto, é necessário comentar algumas características desejáveis que os GPS devem possuir, como uma alta precisão e um software de pós-processamento para correção de erros, de modo que a análise espaço-temporal seja

realizada corretamente [94]. Senão, o procedimento de cálculo das coordenadas de localização do dispositivo sem fio pode conter erros ocasionados pela variação do nível de precisão do GPS utilizado. O tamanho desses erros pode variar de alguns centímetros até dezenas de metros. Assim, quanto menor for o erro, mais precisas serão as coordenadas da localização do dispositivo. Entretanto, o preço dos equipamentos de GPS de alta precisão ainda está elevado, o que dificulta a obtenção de dados com uma alta precisão (erros da ordem de centímetros).

Uma vez capturados os dados, será necessário a filtragem das amostras, que consiste na escolha dos dados que serão efetivamente utilizados na caracterização. Com isso, deve ser considerado o intervalo de tempo das amostras e de seus componentes. Também devem ser retirados dados inconsistentes das amostras, como: erros de gravação nos arquivos e valores discrepantes causados pelo erro no cálculo da posição geográfica. Esse erro pode ser causado pelo problema de múltiplos caminhos do sinal recebido pelo receptor GPS quando este estiver próximo de prédios e construções, e pela interferência de obstáculos como, a copa das árvores e objetos localizados na área de visada da constelação dos satélites. Assim, o uso de equipamentos de GPS de alta precisão tende a diminuir a ocorrência desses erros proporcionando a obtenção de dados contendo uma acurácia maior.

Após a captura e filtragem, tem-se a fase da análise estatística. Essa fase será descrita em detalhes a seguir.

3.4.3 Análise Estatística dos Dados

Com o objetivo de observar e ter mais conhecimento, quantitativo e qualitativo sobre os dados, será aplicado um tratamento estatístico nos componentes do movimento e nas medidas de interesse da análise espaço-temporal proposta na Seção 3.3.

Esse tratamento consiste em calcular várias medidas estatísticas para os componentes avaliados, como: desvio-padrão, variância, coeficiente de variação, valores mínimo e máximo, autocorrelação dos componentes, correlação entre os componentes, freqüência relativa e função de distribuição cumulativa empírica (*empirical*

cumulative distribution function - ecdf) dessas medidas e componentes da mobilidade.

3.4.4 Identificação de Padrões de Comportamento

Nesta etapa será investigada uma possível ocorrência de comportamentos específicos e/ou semelhantes nos dados da mobilidade, que passaram por todas as etapas anteriores. Assim, esta etapa tem o objetivo de detectar padrões e informações sobre a mobilidade analisada. Esta tarefa é importante para que se tenha mais conhecimento sobre a mobilidade e, se possível, possibilitar uma representação mais adequada da realidade, ou seja, fornecer meios para representar a mobilidade de determinados cenários reais. Para isso, o tratamento estatístico nas medidas, obtidas na Seção 3.3, será analisado. Caso o pesquisador, após esse tratamento, não se satisfaça com os dados obtidos, a metodologia permite executar novamente a tarefa de alterar os limiares utilizados nas obtenção das medidas bruscas na análise estatística dos dados. Caso os resultados não estejam ainda satisfatórios, a metodologia permite ao pesquisador capturar e processar novamente os dados, modificando o tipo de tratamento aplicado aos mesmos. Esta tomada de decisão no uso da metodologia quanto a satisfação dos dados obtidos e a necessidade de que os dados sejam capturados novamente são ilustrados na Figura 3.2.

Após uma possível identificação de comportamentos específicos na mobilidade, será investigada a identificação de alguma distribuição de probabilidade conhecida na literatura que mais se aproxima ao comportamento dos componentes dos dados coletados. Isso se dará através do nível de proximidade dos valores dos componentes das amostras com os parâmetros das distribuições analisadas. Para isso, será utilizado o estimador da máxima verossimilhança (*Maximum Likelihood Estimation - MLE*) que terá a função de ajustar os parâmetros das funções de distribuição de probabilidade aos dados dos componentes do movimento real. Para identificar a função de distribuição que obteve a maior proximidade dos dados reais, serão utilizados os seguinte métodos: erro médio quadrático (*Mean Square Error - MSE*) e *Kolmogorov-Smirnov (K-S)*, que estão descritos em [24]. Nestes métodos, são calcu-

lados o erro entre cada conjunto de valores da curva de uma função de distribuição e da curva da distribuição dos dados reais analisados.

Assim, esta etapa permite a identificação de possíveis comportamentos e a obtenção de mais informações sobre a mobilidade investigada. Além disso, esta etapa permite uma comparação formal entre os dados reais e os dados sintéticos, ou seja, uma comparação entre a mobilidade real e a dos modelos de mobilidade. Por exemplo, para verificar o nível de realismo de um modelo de mobilidade, como o modelo RWP, ou verificar quanto um modelo de mobilidade é mais adequado do que um outro modelo, em relação a um cenário ou situação específica.

3.4.5 Visualização dos Resultados Encontrados

Identificar comportamentos na mobilidade analisada é um dos objetivos dessa metodologia de caracterização, entretanto, apresentar esses comportamentos de maneira visual, talvez seja mais importante ainda. Assim, a última etapa desta metodologia aborda a maneira como os dados e informações sobre a mobilidade serão ilustrados. Esta visualização pode ser feita usando tabelas contendo as medidas de interesse, gráficos e diagramas contendo os valores numéricos para os componentes e as medidas analisadas na caracterização; portanto, esta etapa tem o objetivo de facilitar a interpretação dos resultados obtidos. Entretanto, o alcance deste objetivo está diretamente relacionado com a experiência do pesquisador na área de visualização dos dados.

3.5 Considerações

Neste capítulo, foi apresentada uma nova proposta de caracterização da mobilidade de dispositivos baseada numa análise criteriosa dos componentes do movimento de usuários em um ambiente sem fio. Para isso, foram definidas e utilizadas várias medidas de interesse com o objetivo de se ter informações mais detalhadas sobre a mobilidade sob o aspecto espacial dos dispositivos na rede.

Além disso, uma metodologia de caracterização baseada em etapas foi proposta. A partir da descrição e especificação destas etapas, acredita-se que esta metodologia possibilitará a execução da tarefa de quantificação e qualificação do movimento de maneira mais precisa e correta, como é recomendado em [38], permitindo assim, uma análise mais confíavel da mobilidade.

Como grandes resultados buscados com a aplicação dessa proposta de caracterização, têm-se:

- A possibilidade de obtenção de informações mais profundas e detalhadas dos componentes da mobilidade, capturados de cenários reais ou de modelos de mobilidade;
- O fornecimento de dados importantes para o desenvolvimento de novos modelos de mobilidade contendo características mais realistas.
- Uma maneira de medir a acurácia dos modelos de mobilidade em relação a um cenário específico com mobilidade real.

No próximo capítulo, será apresentado um estudo de caso de aplicação dessa proposta para caracterização da mobilidade humana capturada em um cenário real.

Capítulo 4

Uma Investigação Sobre a Mobilidade Humana Capturada em uma Área de Lazer

NESTE capítulo será apresentada uma captura de dados sobre a movimentação de pessoas por uma área turística e de recreação da cidade do Rio de Janeiro. Os dados obtidos nesta captura, por meio de GPS, foram tratados e analisados através da proposta de caracterização descrita no capítulo anterior. Além disso, serão apresentados vários resultados interessantes sobre a velocidade, aceleração, ângulo de mudança de direção e o tempo de pausa da mobilidade humana capturada. Por fim, algumas distribuições de probabilidade foram ajustadas aos dados reais e os resultados obtidos serão mostrados e analisados.

4.1 Caracterização da Mobilidade Humana Capturada em uma Área de Lazer

Como descrito no Capítulo 3, existem poucos trabalhos que abordam a mobilidade humana capturada em cenários reais. Recentemente, surgiram alguns trabalhos, como [95, 96], na mesma linha de investigação desta tese, onde o movimento

é capturado através de GPS, mas esse movimento não possui uma baixa granularidade, visto que o intervalo entre coletas foi de 60 segundos em [95] e de 30 segundos em [96], respectivamente. Como um dos objetivos dessa tese é a caracterização detalhada dos componentes de um movimento humano, percebemos a necessidade de diminuirmos o intervalo de tempo entre as coletas do movimento, para observarmos o deslocamento de aproximadamente um metro ou frações disso. Assim, a duração do intervalo entre as coletas foi de um segundo para o conjunto de experimentos realizados. Esse tempo foi primordial para a extração de informações detalhadas dos componentes e medidas de interesse do movimento humano capturado, visto que a velocidade média das pessoas foi de aproximadamente 1,1 m/s.

Neste contexto, uma investigação da mobilidade de pedestres através da proposta de caracterização descrita no Capítulo 3, será apresentada neste capítulo. Uma versão preliminar desta investigação foi realizada em [49]. Assim, a descrição dos experimentos, o tratamento aplicado aos dados coletados e os resultados alcançados serão descritos a seguir.

4.1.1 Descrição dos Experimentos

Os experimentos foram realizados, entre os meses de janeiro e maio de 2008, no parque Quinta da Boa Vista localizado na cidade do Rio do Janeiro. O parque contém lagos, cavernas, muitas árvores e abriga dois importantes pontos turísticos: o jardim zoológico do Rio de Janeiro e o Museu Nacional. Assim, este parque foi escolhido por ser uma área de lazer bastante freqüentada pelas pessoas e porque o receptor de GPS utilizado apresentou um bom funcionamento para a captura do movimento humano no parque.

A coleta dos registros (*traces*) de movimento ocorreu durante vários dias da semana, das 9:00 às 16:00 horas, ao longo dos meses mencionados anteriormente. Este horário foi escolhido com base em um *software* de planejamento da quantidade de satélites da constelação que cobrem uma determinada área geográfica em um de-

terminado intervalo de tempo[1], de modo a recebermos um sinal de GPS obtido através do uso do maior número de satélites para aquele dia em específico. Caso esse planejamento não seja feito, podemos correr o risco de realizarmos coletas de movimento em um cenário em horários cuja quantidade de satélites seja pequena e, assim, os dados coletados poderão apresentar muitos erros ou falhas. Para a coleta desses *traces* foi usado um receptor de GPS da marca *Trimble*, modelo *Geo XM* [2] (ver Figura 4.1), que possui uma alta precisão (com erro de localização submétrico) e permite um ajuste nos dados coletados através da técnica denominada de correção diferencial[3]. Essas características permitem a obtenção de posições geográficas contendo pequenos erros de localização.

Figura 4.1: Ilustração do GPS utilizado nos experimentos.

Para a coleta dos *traces* de movimento, 120 pessoas que caminhavam pelo parque, em dias e horários diferentes, foram escolhidas aleatoriamente e convidadas para participarem da pesquisa como voluntárias. Todos os voluntários foram informados sobre o objetivo da pesquisa e concordaram em assinar um termo de consentimento para o uso dos dados[4]. Assim, o receptor de GPS foi entregue a cada um dos

[1]Para informações detalhadas sobre este *software* acesse http://www.trimble.com/planningsoftware.shtml

[2]Detalhes sobre este equipamento podem sem encontrados em http://www.trimble.com/geoxm.shtml

[3]Esta técnica, também conhecida como *Differential GPS* (DGPS), ajusta a posição geográfica coletada em relação a uma base de dados geodésica.

[4]O termo de consentimento afirma que o uso dos dados dos experimentos será para atividades

voluntários que movimentaram, de maneira independente, pelo parque. No final da caminhada de cada voluntário, o GPS era recolhido novamente. O intervalo do tempo de coleta do movimento de cada voluntário variou de 300 a 1300 segundos aproximadamente, na qual o tempo entre amostras de cada posição coletada foi de um segundo. Esse intervalo foi limitado pela vontade do voluntário em permitir a coleta de seu movimento, ou por causa de sua saída do parque, ou ainda, por que o mesmo iria entrar no museu ou no jardim zoológico.

Os *traces* coletados foram utilizados também em [97, 98] para a realização de uma análise da influência da mobilidade humana na conectividade de uma rede móvel e em [99], para a avaliação de um novo mecanismo de segurança proposto para as DTNs.

4.1.2 Processamento dos Dados Capturados

Após a coleta dos experimentos, os dados foram submetidos à técnica de correção diferencial com o objetivo de melhorar a acurácia das medidas coletadas pelo GPS, ou seja, diminuir possíveis erros na captura da posição geográfica das pessoas através do GPS. Isso é importante mesmo sabendo que o GPS utilizado apresentou uma boa acurácia no cenário analisado. Para isso, utilizamos o *software Pathfinder Office*[5] e os dados coletados foram corrigidos com base nos arquivos de correção, da base geodésica localizada em São Paulo, disponíveis em sistema Web [6] da empresa Santiago e Cintra, que foi a revendedora do receptor *Geo XM* da *Trimble*.

Além disso, valores discrepantes nos dados, não corrigidos pela técnica de correção diferencial, podem ter ocorrido devido a erros causados por obstáculos como as copas das árvores ou construções como o Museu Nacional. Desta maneira, as posições geográficas que geraram deslocamentos (diferença entre a posição num determinado instante e a posição no instante de tempo anterior) superiores a 2,5 metros

de pesquisa e desenvolvimento, e que os voluntários terão a privacidade dos seus dados garantida e o seu anonimato preservado nos documentos a serem elaborados na pesquisa.

[5]Mais detalhes sobre este *software* acesse http://www.trimble.com/pathfindertools.shtml

[6]SCNet - Sistema de bases GPS disponível pela URL: http://www.santiagoecintra.com.br

foram descartadas[7].

Com o objetivo de realizarmos uma avaliação com *traces* de duração igual de tempo, foram escolhidos os 100 experimentos que tiveram pelo menos 600 segundos de duração (tempo que foi usado nas avaliações, via simulação, dos protocolos de DTN no Capítulo 6). O tempo remanescente (acima de 600 segundos) desses *traces* não foi considerado neste trabalho, juntamente com os 20 *traces* de duração menor que 600 segundos.

Na Figura 4.2, é mostrado o traçado do deslocamento agregado de alguns dos experimentos utilizados na avaliação. Através desta figura, pode ser observado que o deslocamento agregado dos voluntários pelo parque, na maioria das vezes, foi influenciado pelo formato das ruas e trilhas existentes, visto que os *traces* incidiram dentro dessas ruas e trilhas. Assim, podemos dizer que esse deslocamento foi baseado em obstáculos ao contrário do deslocamento aleatório que é gerado pelos modelos de mobilidade, mais utilizados na literatura, o *random walk* e RWP. Essa observação é importante e nos ajudará no entendimento dos resultados obtidos na Seção 4.1.3. Além disso, podemos observar que os *traces* apresentaram uma alta regularidade espacial, o que leva a entender que as pessoas andaram pelos mesmos lugares em intervalos de tempo diferentes. Esta observação foi recentemente identificada por Gonzalez, Hidalgo e Barabasi em uma pesquisa [100], onde foi investigado o padrão da mobilidade humana extraído a partir da análise das ligações e mensagens SMS enviadas ou recebidas de cem mil usuários de telefonia móvel celular dentro do continente europeu durante seis meses.

Uma vez removido os erros dos dados capturados, as outras etapas existentes na metodologia proposta, no capítulo anterior, foram aplicadas aos dados e os resultados obtidos, através da análise estatística, serão apresentados na próxima seção.

[7]Durante os experimentos, foi observado que nenhum voluntário chegou a velocidade de 2,5 m/s. Assim, deslocamentos superiores a 2,5 m que podem ter sido gerados erroneamente foram descartados e, no lugar dos mesmos, foram inseridas posições calculadas pela média entre a posição anterior e posterior ao deslocamento descartado, dividido pelo tempo deste deslocamento.

Figura 4.2: Amostras de *traces* de movimento humano no parque Quinta da Boa Vista.

4.1.3 Resultados Obtidos

Nesta seção apresentamos os resultados estatísticos para cada componente extraído do movimento real. Para isso, as medidas média, variância, desvio padrão, coeficiente de variação, valor mínimo, valor máximo e a quantidade de amostras de cada componente do movimento real foram obtidas e serão mostradas na Tabela 4.1. Nesta tabela, podemos observar que o valor médio da velocidade, aceleração, ângulo de direção e tempo de pausa do movimento capturado foi de 1,127m/s; 0,0004m/s^2; 34,33° e 3,62 segundos, respectivamente. Esses valores serão importantes no contexto do ajuste dos modelos de mobilidade (ver Capítulo 5) com a mobilidade humana do cenário investigado.

Além da investigação das medidas estatísticas obtidas e mostradas anteriormente, a análise das características da distribuição de cada componente do movimento é

Tabela 4.1: Medidas para cada componente do movimento real

Medidas	Vel. (m/s)	Acel. (m/s^2)	Âng. de dir. (°)	T. de pausa (s)
Média	1,127	0,0004	34,3313	3,6227
Variância	0,2835	0,0473	1.854,5554	37,0564
Desvio padrão	0,5324	0,2175	43,0645	6,0874
Coef. de variação	0,4724	576,0821	1,2544	1,6803
Valor mínimo	0,007	-1,19796	0,000089	1
Valor máximo	2,499921	1,185976	179,9868	106
# de amostras	39.617	39.617	39.617	1.092

muito importante, tanto para a consolidação dos resultados obtidos, quanto para a observação dos dados capturados de maneira mais completa [36, 39, 40, 72]. Assim, a função de distribuição de probabilidade empírica (*empirical probability distribution function - epdf*) e a função de distribuição de probabilidade cumulativa empírica (*empirical cumulative distribution function - ecdf*), para cada componente dos dados reais, foram computadas também com base na metodologia proposta (vide Seção 3.4) e serão mostradas a seguir.

Na Figura 4.3, é apresentada a distribuição da **velocidade** dos dados reais. Podemos observar que a curva da distribuição da velocidade tem uma semelhança com a distribuição Normal, exceto na parte inicial da curva. Esta parte apresentou uma concentração de valores (de 0 a 0,25 m/s) que pode ter sido gerada por falhas no GPS ao capturar possíveis pausas no movimento humano. Pois, ele não deveria capturar esses falsos deslocamentos, o que indicaria velocidades iguais a zero no lugar de valores positivos. Assim, uma grande quantidade de valores próximos de zero levaram a esta concentração. Entretanto, a substituição desses pequenos valores por zero após a coleta do movimento é extremamente difícil de se fazer, devido a ocorrência de falso positivos. Esta observação é possível somente quando analisamos a velocidade de maneira agregada.

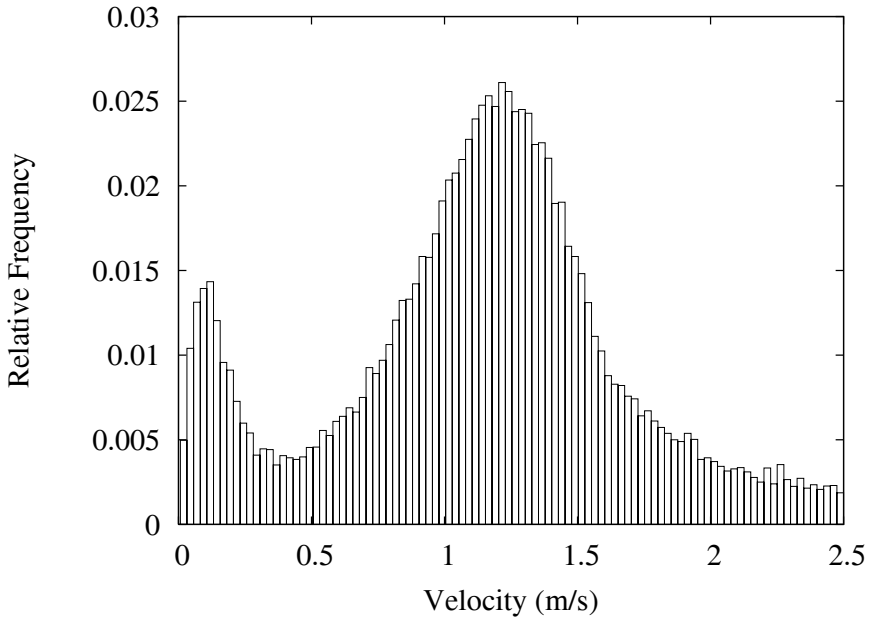


Figura 4.3: Função de distribuição de probabilidade empírica do componente velocidade.

Com o objetivo de analisarmos a variação da velocidade, iremos observar o componente **aceleração** dos dados reais. Assim, a distribuição da aceleração é mostrada na Figura 4.4. A análise da aceleração do movimento de pessoas não foi crucial, visto que os dados foram pouco representativos (valores absolutos muito próximos de zero), mas se analisarmos a aceleração de outros tipos de movimento, como por exemplo o movimento de veículos, esta medida pode ser bem mais representativa. Assim, esses dados foram mostrados por ser mais um resultado possível através da caracterização proposta no Capítulo 3. Entretanto, podemos verificar uma variação homogênea tanto nos valores positivos (aceleração), quanto nos negativos (desaceleração), o que era de se esperar.

O **ângulo de mudança de direção** é importante para investigarmos como se comporta a direção do movimento em um cenário. Diferentemente do comportamento zigue-zague no modelo RWP, o movimento humano apresentou pequenas variações no ângulo de mudança de direção. Isto pode ser visto no traçado do movimento de alguns experimentos plotados na Figura 4.2, bem como no gráfico da distribuição do ângulo de mudança de direção, do movimento humano, mostrado na

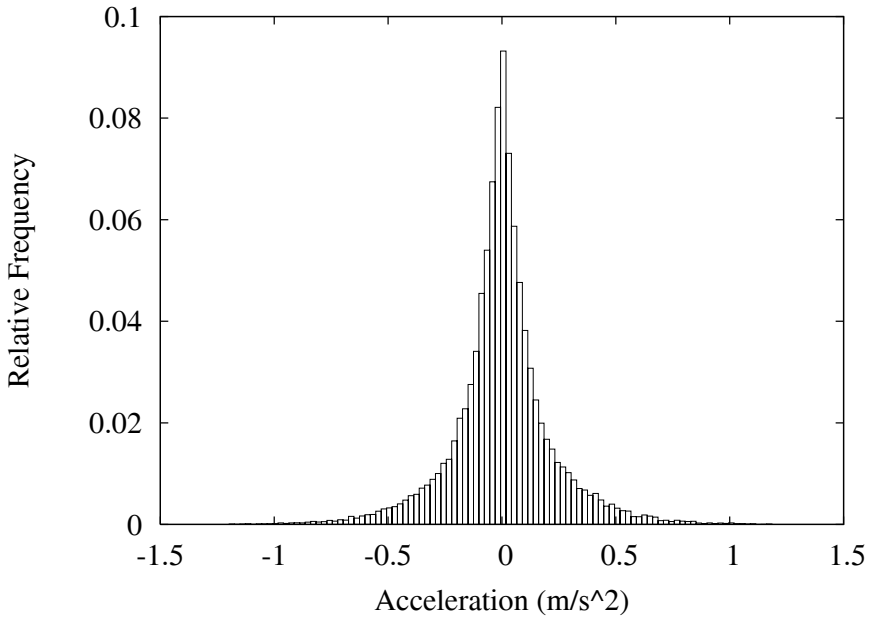


Figura 4.4: Função de distribuição de probabilidade empírica do componente aceleração.

Figura 4.5. Nesta figura, podemos observar que a maioria dos valores para o ângulo estão entre 0 e 45° com uma média de 34,33°. Por outro lado, o ângulo de mudança de direção do modelo RWP possui uma variação uniforme entre 0 e 180°.

O **tempo de pausa** é uma outra medida de interesse a ser analisada para a representação da mobilidade humana, visto que ela afeta o tempo da conectividade da rede e, conseqüentemente, influencia o desempenho dos protocolos utilizados nas MANETs, como pode ser visto em [32, 95]. Deste modo, o tempo de pausa foi calculado também com base na nossa proposta, descrita no capítulo anterior, mas com uma adaptação[8]. Esta adaptação foi necessária, visto que o GPS utilizado detectou deslocamentos de até 0,2m em intervalos de um segundo de duração, ao invés de capturar pausas (deslocamentos de zero metros em intervalos de um segundo) no movimento. Isso foi baseado em observações feitas empiricamente em vários testes

[8]Esta adaptação foi implementada com base na seguinte definição de pausa: todos os deslocamentos iguais ou inferiores a 0,2 metros no intervalo de tempo igual a um segundo, ou até valores múltiplos de 0,2 em intervalos consecutivos de tempo, são definidos como ocorrências de pausa. Entretanto, podem existir falso positivos nas ocorrências de pausa devido à generalização imposta, ou seja, nem sempre os deslocamentos menores que 0,2 metros serão necessariamente uma pausa.

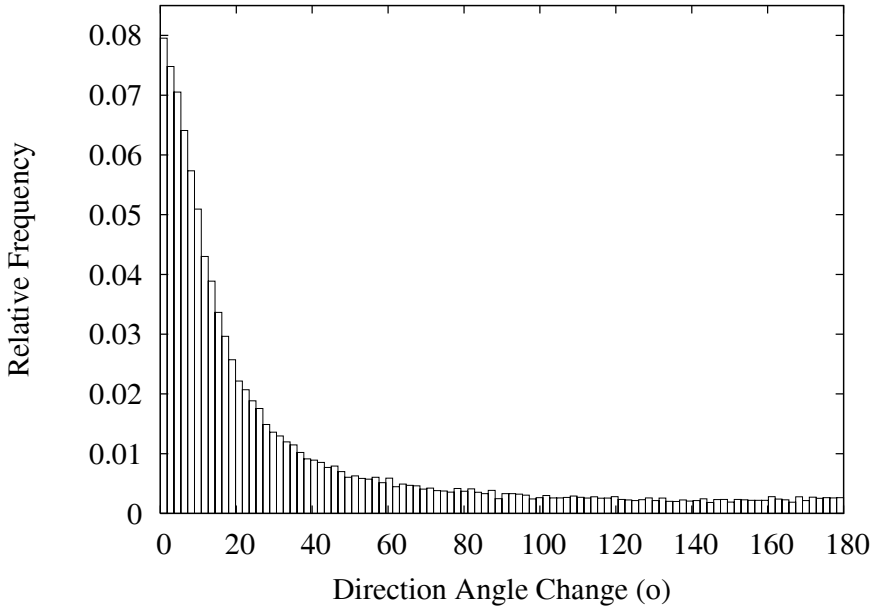


Figura 4.5: Função de distribuição de probabilidade empírica do componente ângulo de mudança de direção.

de campo realizados em casos, onde uma pessoa ficava parada por vários segundos consecutivos de tempo portando o GPS, e o mesmo detectava deslocamentos de até 0,2 metros, no intervalo de tempo igual a um segundo.

Na Figura 4.6 é mostrada a distribuição do tempo de pausa extraída dos dados reais, onde pode ser observado que a maioria dos valores para essa medida ficaram abaixo dos 10 segundos e que, pela Tabela 4.1, o valor médio do tempo de pausa foi de aproximadamente 3,6 segundos. Entretanto, existiram poucas ocorrências de pausa com um grande intervalo de tempo (comportamento de cauda longa) e a frequência relativa da ocorrência de pausas referentes a um segundo apresenta falso positivos, ou seja, pausas que na verdade podem não existir. Esta observação é possível somente quando analisamos o tempo de pausa de maneira agregada. Diante de tudo isso, o uso da média do tempo de pausa, para este cenário em específico, pode não ser uma métrica adequada na parametrização do tempo de pausa dos modelos de mobilidade, ou cuidados devem ser tomados quando utilizarmos esta métrica na parametrização dos modelos em outros cenários.

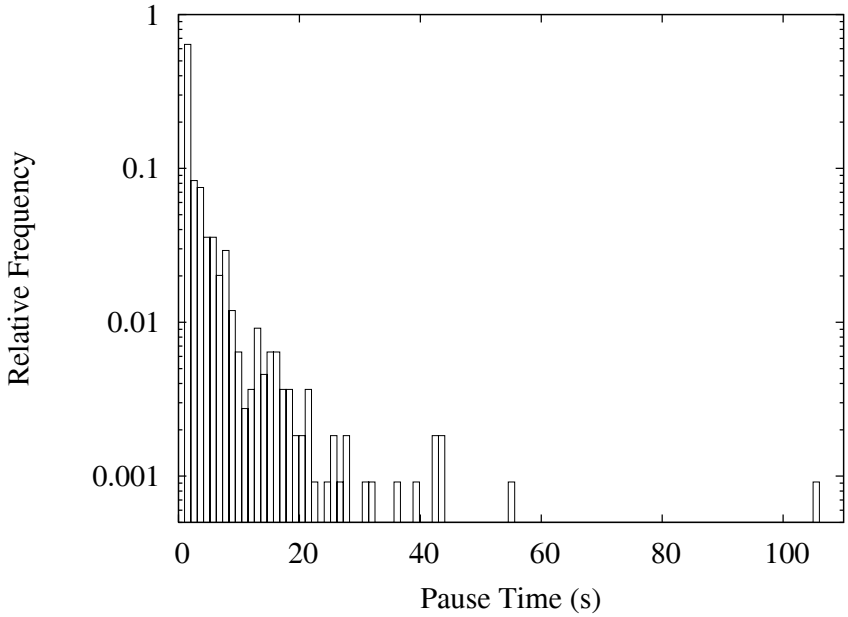


Figura 4.6: Função de distribuição de probabilidade empírica da medida tempo de pausa.

Com o propósito de investigarmos a ocorrência de dependências temporais nos componentes do movimento real, foi computada a **autocorrelação** dos valores obtidos para cada componente. Os resultados obtidos são mostrados na Figura 4.7. Nesta figura, podemos observar que o componente velocidade apresentou um valor alto (entre 0,45 e 0,55) para essa correlação, principalmente, nos menores intervalos de observação entre as amostras. Portanto, podemos dizer que a velocidade da mobilidade capturada apresentou uma alta dependência temporal, ou seja, os valores da velocidade de uma pessoa, em intervalos de tempo próximos (até 10 segundos), estão altamente correlacionados. Isto acontece também com o componente ângulo de mudança de direção, visto que nos menores intervalos de tempo entre as amostras apresentaram uma autocorrelação entre 0,3 e 0,5. Esta correlação pode estar diretamente relacionada com o trajeto realizado pelas pessoas, visto que o trajeto está baseado no cenário do parque investigado. Entretanto, isso não aconteceu com o componente aceleração, que obteve autocorrelação negativa e próxima de zero, como era o esperado. Assim, podemos dizer que a aceleração não apresentou dependência temporal.

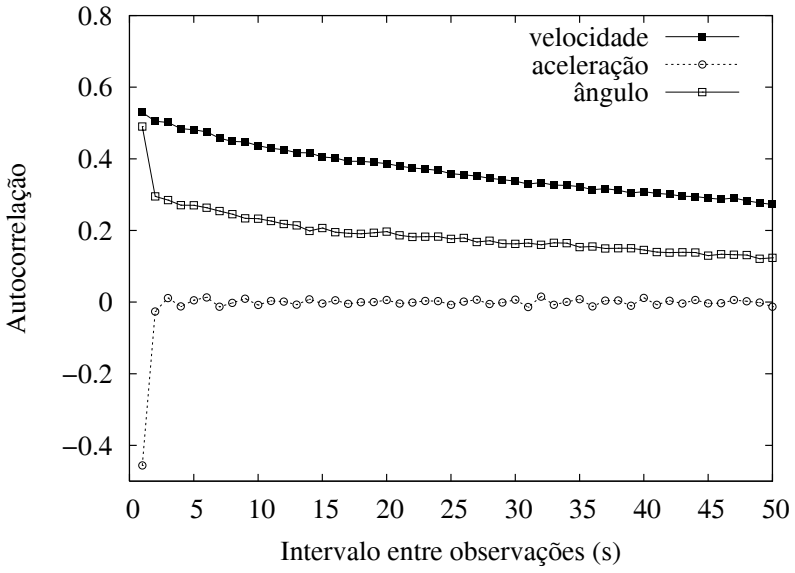


Figura 4.7: Autocorrelação de cada componente do movimento real.

A partir dos resultados obtidos, podemos dizer que a mobilidade humana, capturada no parque, apresentou uma variação suave nos componentes velocidade e ângulo de mudança de direção. Isso permiti-nos dizer que, este movimento é suave e sem mudanças bruscas na velocidade e no ângulo de direção, diferentemente do que será observado, através da Seção 5.4.3, para o comportamento desses componentes nos modelos de mobilidade aleatória (como por exemplo no caso do modelo RWP).

4.2 Ajuste de Algumas Funções de Distribuição de Probabilidade em Relação as Componentes do Movimento Capturado

No sentido de obtermos mais conhecimento sobre a mobilidade humana capturada comparamos os dados reais a algumas funções de distribuição de probabilidade conhecidas. Assim, foram utilizadas as seguintes distribuições: Exponencial, Gamma, Lognormal, Normal e Weibull. O estimador da máxima verossimilhança (*Maximum Likelihood Estimation - MLE*) [24], implementado no *software* MATLAB,

foi usado na escolha dos parâmetros de cada distribuição ajustando-as aos dados reais. Para verificarmos qual distribuição mais se aproximou de um componente dos dados reais, dois métodos foram utilizados: (i) - erro quadrático médio (*Mean Square Error - MSE*) e (ii) - teste de *Kolmogorov-Smirnov* (K-S). Detalhes sobre estes métodos também podem ser encontrados em [24].

Nas próximas seções, apresentaremos os resultados dos ajustes para cada componente do movimento investigado.

4.2.1 Velocidade

Para ilustrar a comparação entre a velocidade dos dados reais e as distribuições mencionadas acima, é apresentada a Figura 4.8, onde é mostrada a ecdf do componente velocidade do movimento real e a distribuição cumulativa das funções Exponencial, Gamma, Lognormal, Normal e Weibull ajustadas ao componente velocidade, através do método MLE. A partir de uma análise visual desta figura podemos observar que a distribuição Normal foi a que mais se aproximou dos dados reais. Além disso, pode ser verificado que as funções de distribuição cumulativa Exponencial, Gamma e Lognormal, ajustadas aos dados reais contém valores superiores a 2,5 m/s, entretanto estes valores não são mostrados na Figura 4.8.

Além da análise visual, foi necessária a realização de uma análise numérica para podermos identificar, de maneira mais formal, qual a função de distribuição que mais se aproximou da distribuição dos dados reais. Assim, através dos métodos MSE e K-S foi computado o erro entre as curvas das funções de distribuição cumulativa e os dados de cada componente da mobilidade humana. Os valores obtidos para os dois métodos podem ser vistos na Tabela 4.2. Através desta tabela podemos verificar que a distribuição Normal foi a que mais se aproximou do componente velocidade dos dados reais, pois apresentou os menores valores para o MSE e K-S. Portanto, a partir dos resultados obtidos podemos dizer que a velocidade do movimento humano, especificamente para os experimentos realizados no parque da Quinta da Boa Vista, segue uma função de distribuição Normal.

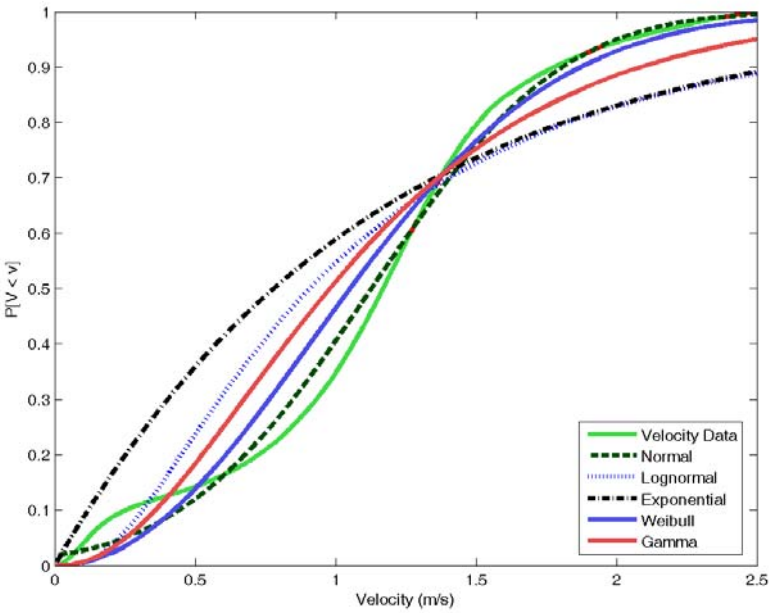


Figura 4.8: Função de distribuição cumulativa empírica da velocidade e uma comparação com as funções de distribuição cumulativa Exponencial, Gamma, Lognormal, Normal e Weibull.

4.2.2 Aceleração

Na Figura 4.9 é apresentado o ajuste da distribuição cumulativa empírica, do componente aceleração, somente com a distribuição Normal, pois somente esta distribuição assumiu valores negativos semelhantemente aos dados reais. Através de uma análise visual e pela observação dos pequenos valores obtidos para MSE e K-S desta distribuição, em relação aos dados reais, pode-se verificar que esta distribuição aproximou-se do componente aceleração dos dados reais.

4.2.3 Ângulo de mudança de direção

O ângulo de mudança de direção da mobilidade humana também foi comparado com as funções de distribuição. Assim, a Figura 4.10 mostra essas distribuições ajustadas aos dados reais desse componente. Através desta figura, pode ser visua-

Tabela 4.2: MSE e K-S entre os componentes da mobilidade humana e algumas funções de distribuição de probabilidade.

MSE					
Medida	Normal	Lognormal	Exponencial	Weibull	Gamma
Velocidade	0,00114	0,015743	0,025666	0,004319	0,009347
Aceleração	0,003768				
Ângulo de direção	0,017592	0,000286	0,007422	0,000953	0,001783
Tempo de pausa	0,014204	0,004299	0,005969	0,005414	0,006212
K-S test					
Medida	Normal	Lognormal	Exponencial	Weibull	Gamma
Velocidade	0,059284	0,215795	0,280499	0,118627	0,170827
Aceleração	0,093359				
Ângulo de direção	0,21509	0,045648	0,137508	0,054586	0,075204
Tempo de pausa	0,33322	0,278784	0,241215	0,270474	0,254035

lizado que a distribuição Lognormal foi a que teve a melhor aproximação à curva do ângulo de mudança de direção. Isso pode ser verificado através da Tabela 4.2, onde o menor valor para MSE e K-S foi da distribuição Lognormal. Além disso, foi verificado que as distribuições Gamma, Lognormal e Weibull ajustaram à curva dos dados reais, mas contendo valores acima de 180°, sendo que esses valores não foram plotados na Figura 4.10.

4.2.4 Tempo de pausa

Na Figura 4.11 é apresentada a curva da distribuição cumulativa empírica da medida tempo de pausa dos dados reais e as funções de distribuição ajustadas à curva dos dados reais. Podemos observar, através da Tabela 4.2, que o menor MSE foi da distribuição Lognormal, semelhantemente observado nos trabalhos [32, 36, 72, 79, 95]. Entretanto, através do teste K-S a curva da distribuição cumulativa empírica

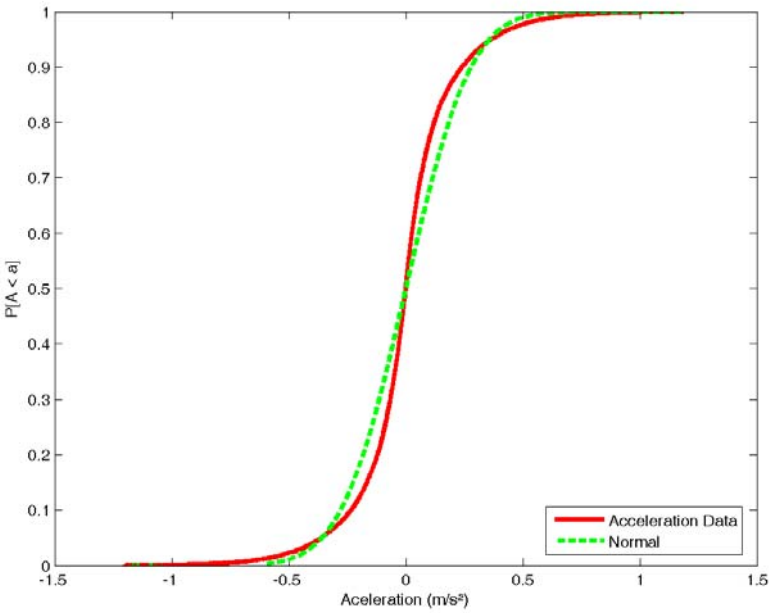


Figura 4.9: Função de distribuição cumulativa empírica da aceleração e uma comparação com a função de distribuição cumulativa Normal.

do tempo de pausa seguiu uma distribuição Exponencial. Esta divergência pode ter ocorrido devido à quantidade de amostras analisadas para o tempo de pausa ter sido pequena, cerca de 36 vezes menor que a quantidade dos outros componentes. Assim, em trabalhos futuros pretendemos investigar maiores quantidades de amostras para o tempo de pausa.

4.3 Conclusões

Neste capítulo foi apresentado um estudo aprofundado e criterioso sobre as características da mobilidade humana, capturada em uma área de lazer. Para isso, foi realizada a captura do movimento de pessoas através de um receptor de GPS durante vários meses. As pessoas voluntárias autorizaram o estudo sobre os dados capturados e assim, estes foram tratados em laboratório através da proposta de caracterização apresentada no Capítulo 3. Após esse tratamento, várias medidas estatísticas referentes ao movimento foram computadas.

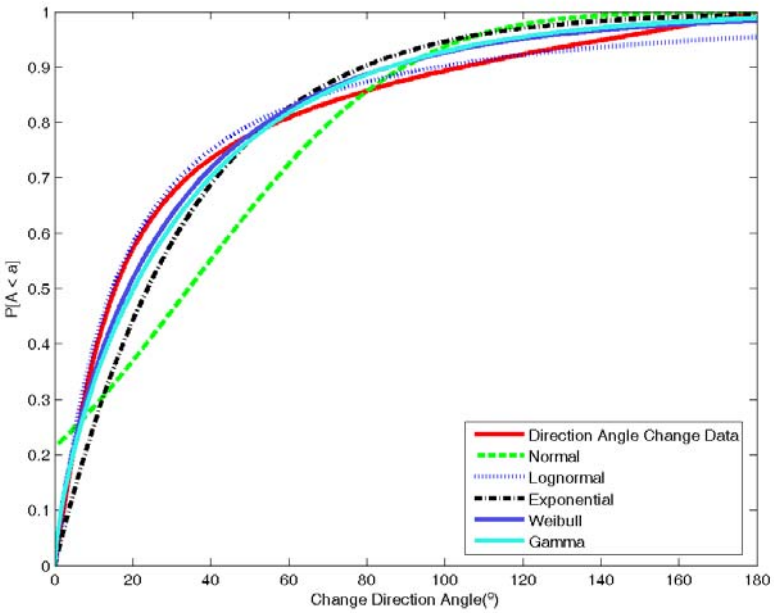


Figura 4.10: Função de distribuição cumulativa empírica do componente ângulo de mudança de direção e uma comparação com as funções de distribuição cumulativa Exponencial, Gamma, Lognormal, Normal e Weibull.

Além disso, alguns resultados estatísticos sobre os componentes desse movimento foram obtidos. Através desses resultados, podemos dizer que a velocidade e o ângulo de mudança de direção do movimento apresentaram uma variação suave ao longo do tempo, diferentemente do que acontece com os modelos aleatórios. Também verificamos, através dos mesmos dados, que esses componentes apresentaram uma dependência temporal, evidenciando mais uma vez que os modelos aleatórios (na qual assumimos inexistência de dependência temporal e que será confirmado nos resultados da Seção 5.4.3) não são indicados para esse tipo de movimentação.

Por fim, um conjunto de distribuições de probabilidade foram ajustadas aos dados de cada componente e, através de uma comparação numérica, verificamos que os componentes velocidade e aceleração seguem uma distribuição Normal, e o ângulo de mudança de direção e o tempo de pausa seguem uma distribuição Lognormal.

Acreditamos que estas medidas e o ajuste das distribuições às mesmas poderão ser importantes na parametrização de modelos de mobilidade que pretendam re-

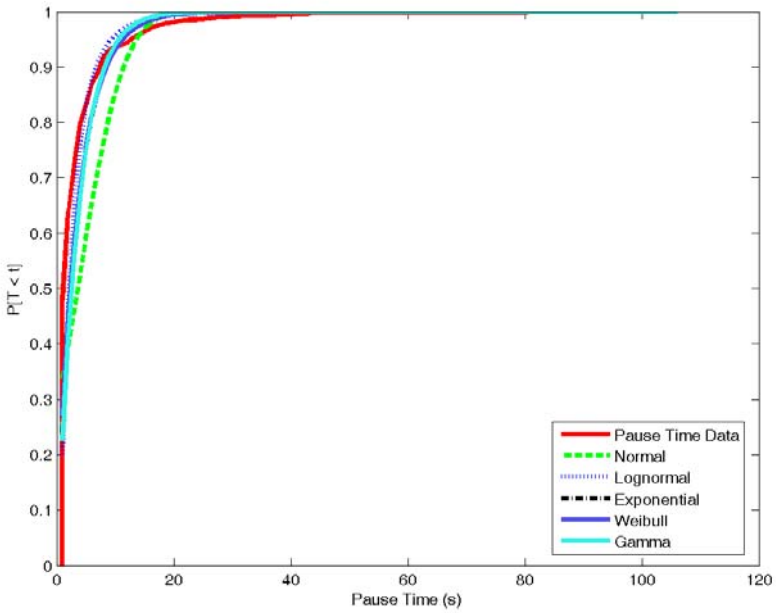


Figura 4.11: Função de distribuição cumulativa empírica do tempo de pausa e uma comparação com as funções de distribuição cumulativa Exponencial, Gamma, Lognormal, Normal e Weibull.

presentar o movimento de pessoas em uma área de lazer, como a investigada neste capítulo. Entretanto, esses resultados são específicos para o cenário investigado, não podendo ser generalizados para representarem a mobilidade humana em cenários quaisquer.

Capítulo 5

Uma Proposta de Técnica para o Ajuste de Modelos de Mobilidade

OS modelos de mobilidade são utilizados para representar o movimento de usuários móveis nas simulações para a avaliação de redes de comunicação sem fio móveis. Entretanto, nos últimos anos, esses modelos vêm sendo questionados por dois motivos: a forma como têm sido utilizados e pela existência de características não realistas nos mesmos. Dentro desse contexto, neste capítulo propomos uma nova técnica de ajuste de modelos de mobilidade a dados de movimentação real, baseada no método do erro quadrático médio. Para isso, apresentamos um algoritmo que ajusta os componentes extraídos do movimento dos modelos de mobilidade, com os componentes extraídos do movimento real. Além disso, os parâmetros de diferentes modelos de mobilidade foram ajustados em relação à mobilidade humana, capturada em um cenário real. Diversos resultados são apresentados evidenciando a importância desse ajuste para a realização, de maneira mais precisa e confiável, de simulações da mobilidade.

5.1 Introdução

A mobilidade dos usuários, como foi mencionado ao longo desta tese, deve ser um

dos principais aspectos a serem considerados na avaliação de desempenho das MANETs. Assim, uma grande quantidade de modelos sintéticos de mobilidade foram propostos na literatura com o objetivo de representar essa mobilidade dos usuários na simulação das MANETs, como descrito no Capítulo 2. Dentro desse contexto, os modelos aleatórios são os mais utilizados, principalmente, o modelo RWP. Entretanto, vários problemas ou características indesejáveis, como a ocorrência de *paradas abruptas* no movimento e *mudanças bruscas de direção* [20], o *efeito das regras de borda* no movimento [20], o *comportamento zigue-zague* da direção do movimento [23], o *decaimento na velocidade média* quando analisada a fase transiente da simulação [37, 101] e a *distribuição espacial não uniforme* dos nós, descrito em [101], foram identificados nesses modelos. Portanto, se esses problemas não forem levados em consideração, a precisão dos resultados obtidos nas simulações pode ser prejudicada.

Além disso, alguns problemas, erros e/ou fraquezas foram encontradas na avaliação de desempenho das MANETs realizada através da técnica de simulação. Estes problemas são causados por incoerências, omissões ou negligências dos pesquisadores no uso desta técnica. Em [24, 38, 39, 40, 102], soluções para esses problemas são apresentadas, como a *remoção da fase transiente* das simulações, o uso da técnica de *simulação perfeita*, o uso de *frameworks* para a realização de simulações mais rigorosas e permitir a *repetibilidade dos experimentos* e, finalmente, a aplicação de uma *análise estatística robusta* sobre os dados obtidos. No entanto, muitos desses problemas continuam sem solução.

Assim, avaliar o desempenho das MANETs através de registros (*traces*) obtidos em medições reais é cada vez mais necessário, conforme mencionado nos capítulos anteriores. Nos últimos anos, experimentos reais e *testbeds*, para a avaliação das redes sem fio em geral, têm sido realizados buscando-se obter resultados mais precisos e representativos em comparação aos resultados encontrados via simulação ou modelagem analítica. Entretanto, esses estudos têm sido conduzidos sem o objetivo de capturar o movimento real dos usuários em uma rede sem infraestrutura (como as MANETs e DTNs). Isso permitiria investigar precisamente os componentes do movimento dos usuários em um cenário real e, validar o nível de realismo dos modelos

sintéticos de mobilidade.

Dessa maneira, neste capítulo iremos comparar o comportamento da mobilidade humana, apresentada no Capítulo 4, com o movimento gerado por vários modelos de mobilidade, de modo a realizar uma validação dos mesmos quanto ao nível de proximidade desses com a mobilidade real capturada. Para isso, será proposta uma técnica de ajuste dos parâmetros de configuração de cada modelo de mobilidade com as características de cada componente da mobilidade humana obtida no cenário real. Este ajuste dos parâmetros será baseado na escolha de uma instância, dentre um conjunto de rodadas de simulação, de um modelo com o resultado de menor erro quadrático médio para cada componente do movimento gerado, em comparação com os componentes da mobilidade humana investigada. Em [50], resultados preliminares deste ajuste foram apresentados. Assim, resultados comparando os componentes velocidade, aceleração, ângulo de direção, tempo de pausa e medidas como autocorrelação dos componentes serão mostrados e analisados.

5.2 Trabalhos Relacionados

Após a identificação de problemas nas características dos modelos de mobilidade aleatória, principalmente no modelo RWP, a área de modelos de mobilidade vem sendo investigada exaustivamente. Diversos modelos foram propostos visando resolver alguns dos problemas descritos na seção anterior. Em [20] é apresentado o modelo *Smooth* que é baseado em processos estocásticos. Um modelo Markoviano foi proposto em [68] e modificado em [46]. Essa modificação foi apresentada na Seção 2.2. Recentemente, duas variações do modelo *Levy-walk*, que é baseado na distribuição de *Levy*, foram propostas em [79, 96]. Adicionalmente, alguns modelos baseados em obstáculos foram propostos em [71, 75].

Nos últimos anos, modelos mais realistas têm sido propostos. Por exemplo, em [32] é extraído um modelo de mobilidade a partir de registros (*traces*) dos usuários de redes locais sem fio (WLAN). Este modelo estima a posição física dos clientes Wi-Fi a partir dos *traces* da associação desses clientes aos pontos de acesso de uma

WLAN. Também em [103], um modelo de mobilidade realista é proposto combinando os dados da associação de clientes Wi-Fi às suas WLANs com o auxílio de um mapa do ambiente monitorado.

Entretanto, foi descoberto em [104] que o uso do movimento extraído da associação dos clientes Wi-Fi aos pontos de acesso de WLANs, pode apresentar características indesejáveis. Essas características são: o efeito *pingue-pongue* (associações e reassociações em diferentes pontos de acesso em intervalos de tempo muito pequenos), a ocorrência de *falhas* na localização dos pontos de acesso (ausência de informações de localização de um ponto de acesso em um determinado instante), a existência de *micro-variações* nos sinais transmitidos pela camada física (que atrapalham a obtenção de informações da posição dos dispositivos em relação a um referencial) e a possibilidade de *erros na reprodutibilidade* dos experimentos (o que dificulta a validação de novas pesquisas). Além disso, dependendo da densidade do número de pontos de acesso no ambiente, a precisão das coordenadas do movimento obtido pode ser muito afetada. Desse modo, a obtenção de dados de mobilidade real tem sido o foco de alguns trabalhos, como pode ser visto em [36, 79, 96, 100].

Em [36], o movimento é extraído da comunicação entre dispositivos sem fio (*iMotes*) em um cenário real e importantes resultados foram obtidos como a análise do tempo de contato e do tempo entre contatos dos dispositivos sem fio. Já em [79, 96], o movimento foi obtido através do uso de equipamentos de GPS portado por pessoas em cenários reais. Nesses trabalhos, importantes resultados sobre características do movimento humano foram obtidos. Entretanto, os dados coletados não possuem uma granularidade muito fina, ou seja, o intervalo entre coleta de dados não é muito pequeno para que seja analisado detalhadamente o movimento humano.

Recentemente, uma análise da mobilidade humana extraída de ligações telefônicas dos celulares de pessoas movimentando-se por uma região metropolitana, é apresentada em [100]. Nesse trabalho foi observado que as pessoas andam pelos mesmos lugares em diferentes períodos de tempo e com uma alta regularidade espacial, e tanto os modelos aleatórios quanto o modelo *Levy-walk* não possuem essas características. No entanto, pouco se sabe sobre a relação de proximidade desses

movimentos reais com os modelos de mobilidade existentes na literatura, ou se existe uma maneira de ajustar esses modelos para esse contexto, possibilitando os seguintes questionamentos.

1. **Qual o modelo de mobilidade é mais adequado para representar a mobilidade humana?**
2. **Como podemos saber se um determinado valor para um parâmetro de um modelo de mobilidade é adequado para a representação de um movimento em um cenário real?**
3. **Qual a justificativa de se usar determinados valores para os parâmetros de um modelo sintético de mobilidade em uma simulação?**
4. **Ou será que todas essas perguntas são desprezíveis?**

Para buscar respostas aos questionamentos acima, na próxima seção, será apresentada a proposta de uma técnica de ajuste dos parâmetros dos modelos de mobilidade, em relação a cenários específicos. Dentro do limite do nosso conhecimento, esse é o primeiro trabalho que investiga o nível de proximidade de modelos sintéticos com a mobilidade real, através da comparação dos componentes extraídos do movimento real e dos extraídos do movimento sintético.

5.3 A Técnica de Ajuste Proposta

Como mencionado na seção anterior, pouco tem sido feito no sentido de se utilizar os modelos de mobilidade de maneira adequada para a representação do movimento em um determinado cenário. Assim, é proposta nesta seção uma técnica de ajuste dos parâmetros dos modelos de mobilidade, onde é comparado o comportamento de cada componente do movimento sintético, gerado pelos modelos, com os componentes do movimento humano extraídos dos *traces* reais. Para isso, os dados de cada componente do movimento real serão obtidos, através da metodologia apresentada na Seção 3.4, e suas medidas tais como, a distribuição da frequência relativa,

ou a distribuição cumulativa ou a distribuição cumulativa complementar de cada componente, serão computadas.

Depois de executado um conjunto grande de simulações alterando-se estes parâmetros é aplicado aos dados obtidos, em cada "rodada" de simulação, o método do Erro Quadrático Médio (*Mean Square Error - MSE*) para computar a diferença entre os dados reais e sintéticos. Assim, o algoritmo computará o MSE de cada "rodada" de simulação para cada componente e mostrará a "rodada" de menor MSE para cada componente. Dadas as três "rodadas", cada uma com o menor MSE de cada componente, a escolha de uma dessas dá-se através de uma análise visual. Após a escolha da "rodada" de menor MSE, seus parâmetros serão os utilizados para aquele modelo de mobilidade no cenário investigado.

O MSE estima a média dos erros quadráticos de uma função $f'(x)$ em relação a função $f(x)$. Assim,

$$MSE(f'(x)) = \frac{\sum_1^N \|f'(x) - f(x)\|^2}{N}, \tag{5.1}$$

onde N é o número de amostras comparadas.

A escolha do método MSE como o estimador dos parâmetros de cada modelo de mobilidade foi feita com base em [105]. Entretanto, outros métodos de comparação de dados podem ser utilizados. Para isso, basta alterar os passos 6 e 7 do algoritmo proposto a seguir.

5.3.1 O Algoritmo de Ajuste

Para o uso da técnica proposta será apresentado um algoritmo contendo sete passos que buscam descrever as rotinas necessárias para o ajuste, de maneira bastante genérica, para a obtenção dos parâmetros que apresentarão o menor MSE entre as rodadas de simulação de um modelo de mobilidade em relação aos dados reais. Na Figura 5.1 é apresentado um fluxograma representando o funcionamento do algoritmo de ajuste.

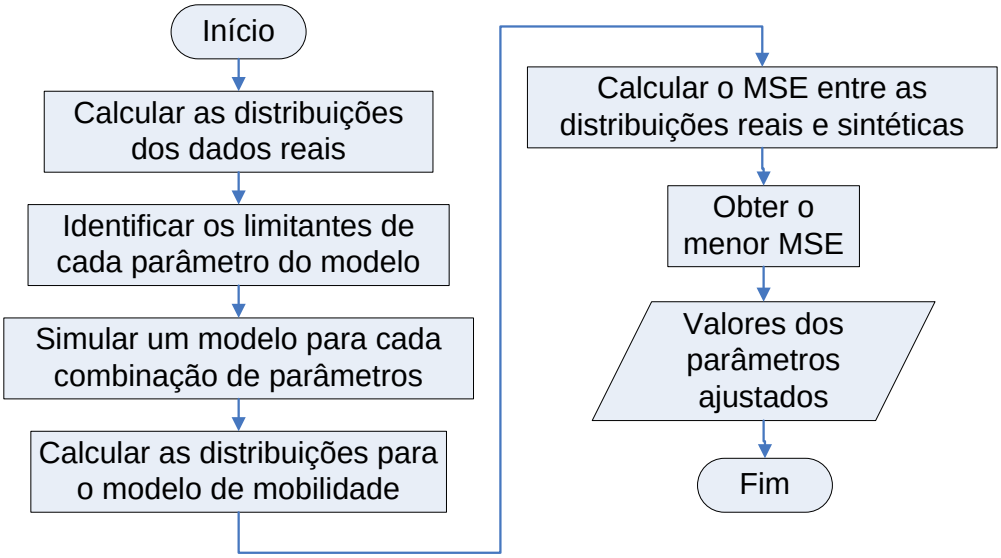


Figura 5.1: Fluxograma do algoritmo de ajuste.

Agora, essa técnica de ajuste será descrita na forma de sete passos do algoritmo, de maneira detalhada.

Passo 1: Computar a distribuição dos componentes do movimento sobre os dados reais

Esta etapa se refere a aplicação da análise espaço-temporal, descrita no Capítulo 3, aos dados de posição dos dispositivos, capturados ao longo do tempo para extrairmos os componentes: velocidade, aceleração e ângulo de direção dos mesmos. A aplicação desta análise deve ser feita com base na metodologia de processamento dos dados também descrita no Capítulo 3. Após a extração de cada componente, devem ser computadas a distribuição empírica e as medidas estatísticas como: média, variância, valor mínimo e máximo desses componentes.

A distribuição empírica pode ser da frequência relativa, bem como a distribuição cumulativa ou a cumulativa complementar dos componentes do movimento. Nesta tese será usada a distribuição cumulativa dos dados empíricos, visto que a curva da frequência relativa dos dados simulados apresentou grandes variações, dificultando a sua comparação com a curva da frequência relativa dos dados reais. Já a curva da distruibuição cumulativa dos dados simulados apresentou uma forma mais bem

definida, o que facilitou a sua comparação com a distribuição cumulativa dos dados reais e, por isso, foi a escolhida como mencionado anteriormente.

Passo 2: Identificar os limites inferior e superior a serem utilizados em cada parâmetro no modelo de mobilidade analisado

Para verificarmos um conjunto representativo de valores para cada parâmetro de um modelo de mobilidade é necessário estabelecermos os valores limites (inferior e superior) que um parâmetro, do modelo em questão, poderá assumir. Assim, esses limites serão estabelecidos com base na média e nos valores mínimo e máximo de cada componente do movimento real analisado. Por exemplo, os parâmetros de um modelo de mobilidade que se referem a velocidade, serão limitados de acordo com os valores mínimo e máximo encontrados no movimento real.

Passo 3: Escolher um valor para o incremento utilizado na variação dos parâmetros dos modelos de mobilidade avaliados, desde o seu limite inferior até o seu limite superior

Ainda com relação ao objetivo de verificarmos um conjunto representativo de valores para cada parâmetro é necessário escolhermos o valor da variação incremental entre os limites inferior e o superior do parâmetro em questão. Assim, quanto menor for essa variação, maior será o conjunto de valores a serem comparados para cada parâmetro e vice-versa.

Passo 4: Simular o modelo de mobilidade a ser ajustado para cada combinação de parâmetros com o conjunto de variações definido no passo anterior

Neste passo será executado o modelo de mobilidade em questão, várias vezes, onde cada rodada de simulação terá um valor diferente para cada parâmetro. Este valor aumentará de maneira incremental a partir do limite inferior até o superior, de acordo com o passo anterior e com o número de dispositivos encontrados nos dados reais. Por exemplo, se os dados reais forem referentes a cinquenta dispositivos, cada rodada de simulação terá a geração de movimento de cinquenta nós com os parâmetros configurados dentro dos limites estabelecidos.

Passo 5: Computar a distribuição dos componentes do movimento gerado pelo modelo de mobilidade, para todas as combinações dos valores de todos os seus parâmetros

Depois da execução de todas as rodadas de simulação, neste passo serão extraídos os componentes do movimento simulado pelo modelo de mobilidade e também a distribuição cumulativa empírica de cada componente investigado, da mesma maneira que no passo 1.

Passo 6: Calcular o MSE das distribuições obtidas no passo anterior em relação a distribuição dos dados reais

Após a obtenção da distribuição empírica de cada componente dos dados reais e dos componentes de todas as rodadas de simulação do modelo em questão, será calculado o MSE da curva da distribuição cumulativa empírica de todas as rodadas com a curva da distribuição dos dados reais.

Passo 7: Obter os parâmetros do modelo investigado referentes ao menor MSE para cada componente

Neste passo será encontrado o menor MSE entre todos os obtidos para cada componente analisado. Feito isso, será retornado o valor de cada parâmetro que apresentou o menor MSE para cada componente analisado dos dados extraídos do modelo de mobilidade em questão. Esses valores serão os utilizados pelo pesquisador para a simulação do modelo de mobilidade ajustado ao movimento real.

5.3.2 Comentários sobre o algoritmo

Em relação a utilização do algoritmo proposto, cuidados devem ser tomados na escolha dos valores limites de cada parâmetro de configuração de um modelo de mobilidade, bem como na escolha do incremento de variação no valor desses parâmetros, para permitir a execução de várias rodadas de simulação. Quanto maior for a quantidade de rodadas de simulação, maior será a possibilidade de encontrar os parâmetros mais adequados de um modelo de mobilidade em relação aos dados

de um movimento real. Além disso, esse algoritmo deve ser aplicado aos modelos de mobilidade seguindo a metodologia de caracterização da mobilidade, proposta no Capítulo 3 desta tese.

Sobre esse algoritmo de ajuste é importante mencionarmos alguns detalhes observados na complexidade do tempo de sua execução. Esta complexidade está em função do tamanho dos dados de entrada a serem utilizados, tais como: valor dos limites inferior e superior de cada parâmetro de um modelo de mobilidade e o incremento de variação desses parâmetros, número de modelos de mobilidade a serem ajustados, tempo da simulação, número de nós de uma simulação, etc. Além disso, é importante dizermos que quanto maior for a quantidade de parâmetros de configuração um modelo de mobilidade, maior será o tempo de execução do algoritmo.

Além do uso da técnica de ajuste, proposta neste capítulo, a mesma foi utilizada por R. Bezerra, em [97, 98], para a realização de uma análise da influência da mobilidade (real e sintética) na conectividade de uma rede móvel.

5.4 Ajustando Vários Modelos de Mobilidade em Relação a Dados de Mobilidade Humana

Como estudo de caso da técnica proposta na seção anterior, será investigado o ajuste dos componentes do movimento gerado por diversos tipos de modelos de mobilidade com os componentes da mobilidade humana capturada, no parque Quinta da Boa Vista, e que foi detalhadamente descrita e analisada no Capítulo 4. Assim, será validado se os modelos analisados se adequam ao comportamento da mobilidade real. Nas seções abaixo, serão descritos os modelos de mobilidade investigados, as características das simulações realizadas e da técnica de ajuste, bem como os resultados obtidos.

5.4.1 Modelos de Mobilidade Avaliados

Para a aplicação da técnica de ajuste, foram escolhidos cinco modelos de mobilidade: o Browniano e o RWP, que são modelos aleatórios, o modelo *Smooth* que é baseado em processo estocástico, o nosso modelo MMIG que é um modelo Markoviano e o *Levy-walk* que é considerado um modelo realista. A seguir, o funcionamento desses modelos será novamente detalhado.

No modelo de mobilidade Browniano, um dispositivo móvel posicionado em um determinado local movimenta-se para uma nova posição na área de simulação escolhendo novos valores para sua direção e sua velocidade, onde esses valores são distribuídos uniformemente entre [0 e 2Π] e [v_{min} e v_{max}], respectivamente. Por causa dessas escolhas serem aleatórias, o modelo gera movimentos não realistas, como mudanças bruscas de velocidade e direção.

Um nó regido pelo modelo RWP escolhe aleatoriamente uma nova posição, dentro da área de simulação, e se desloca por uma linha reta até esta posição, com uma velocidade constante escolhida aleatoriamente dentro de um intervalo [v_{min} e v_{max}]. Quando o nó chega nesta nova posição ele pára o movimento e fica parado nesta posição por um intervalo de tempo escolhido entre [t_{min} e t_{max}] que é conhecido por tempo de pausa. Feito isso, o nó reinicia o processo de movimentação.

O modelo de mobilidade *Smooth* considera a dependência temporal da velocidade sob vários intervalos de tempo. Após um evento de mudança na velocidade, uma nova velocidade alvo é escolhida a partir de um conjunto de velocidades preferenciais da função de distribuição de probabilidade que rege a velocidade e, em seguida, a velocidade dos dispositivos é mudada gradativamente a partir da velocidade atual até a nova velocidade. O valor da aceleração influencia o valor final da velocidade. Se a aceleração for um valor muito pequeno, então a velocidade será alterada lentamente e assim, espera-se que o nível da correlação temporal seja alto. Caso contrário, a velocidade pode ser alterada de forma rápida e, assim, a sua correlação temporal será pequena. Outro parâmetro que influencia a distribuição da velocidade é a probabilidade da mudança de velocidade. Se configurarmos esta probabilidade com

um valor pequeno, a velocidade não mudará freqüentemente.

O deslocamento dos nós seguindo o nosso modelo MMIG é regido por um processo Markoviano, onde uma cadeia de Markov com parâmetro discreto governa a coordenada x do nó e uma outra cadeia governa a sua coordenada y. Cada estado da cadeia representa um incremento na posição do nó em cada coordenada. O parâmetro m representa a intensidade de mudança de direção, onde, com probabilidade m, o nó muda para estados à sua direita, o mesmo m para estados à esquerda e com $1 - 2m$, o nó permanece no estado atual da cadeia de Markov. O parâmetro b é a base do número que representa a velocidade do nó. Essa velocidade é dada por b^i, onde i varia de 1 até o número máximo de estados definido como e, que é o estado mais à direita ou à esquerda do estado zero. Como esse número é calculado usando a relação de b com a velocidade máxima a ser representada, a escolha desses valores deve ser feita no sentido de ter uma variação suave na velocidade do nó.

O modelo *Levy-walk* é baseado na função de distribuição *Levy*. Nesse modelo são utilizadas várias variáveis, tais como: tamanho do vôo (*flight length* - l), direção (θ), tempo do vôo (*flight time* - Δt_f) e tempo de pausa (Δt_p). O restante das variáveis são usadas para um ajuste fino do modelo e a descrição das mesmas pode ser encontrada em [79]. O modelo seleciona l e (Δt_p) aleatoriamente a partir de suas distribuições $p(l)$ e $\psi(\Delta t_p)$, que são distribuições *Levy* com os coeficientes α e β, respectivamente. Este modelo pode emular características do movimento por meio do ajuste dos seus parâmetros e tem sido utilizado por físicos e biólogos na representação do movimento de partículas, animais e seres humanos.

5.4.2 Características das Simulações e da Técnica de Ajuste

Para a obtenção dos componentes do movimento gerado pelos modelos de mobilidade, a proposta de caracterização (vide Capítulo 3) será utilizada. Assim, os componentes velocidade, aceleração, ângulo de mudança de direção, a medida tempo de pausa; a autocorrelação de todos esses componentes e as medidas para todos os modelos serão investigadas nas seções seguintes.

Para a simulação de todos os modelos, com exceção do modelo *Levy-walk*, foi utilizada a ferramenta ScenGen[1]. Já para a simulação do *Levy-walk*, foi utilizado o *software* MATLAB. O tempo de simulação foi de aproximadamente 1.610 segundos, na qual os primeiros 1.000 segundos foram excluídos com o objetivo de eliminar a fase transiente das simulações, como discutido na Seção 5.1. O tamanho da área de simulação foi de $800 \times 600\ m^2$ para representar o mesmo tamanho da área dos experimentos reais, entretanto, o movimento gerado por todos os modelos de mobilidade não levou em conta os obstáculos e ruas do parque. Um ponto importante é permitir que os modelos de mobilidade levem em consideração os obstáculos e acessos de um cenário real, sendo assim, esta consideração será um desdobramento futuro dessa tese.

O algoritmo de ajuste foi implementado também no *software* MATLAB. Os valores para os limites inferior e superior de cada parâmetro, para cada modelo, foram baseados nos valores mínimos e máximos dos componentes velocidade e ângulo de direção dos dados reais. Entretanto, a tarefa de escolher esses limites para alguns parâmetros dos modelos *Levy-walk*, MMIG e *Smooth* está diretamente relacionada ao conhecimento do pesquisador em relação ao funcionamento desses modelos. É importante dizer que foi extremamente difícil descobrir esses limites para o modelo *Levy-walk*, visto que este possui 15 parâmetros de configuração e que a maioria desses não têm um significado intuitivo. Por exemplo, como limitar inferiormente e superiormente, em relação aos dados reais, os parâmetros α e β, que são os coeficientes de ajuste das distribuições *Levy* utilizadas no modelo?

Assim, no projeto de novos modelos, a elaboração de parâmetros mais intuitivos e fáceis de serem configurados, proporcionará um maior uso desse modelo e uma correta configuração dos seus parâmetros por parte dos pesquisadores. Podemos dizer que quanto mais complexo (grande número de parâmetros cuja configuração não é intuitiva) for um modelo de mobilidade, mesmo que este possua características mais realistas, mais difícil será estimar os limites dos seus parâmetros para possibilitar um ajuste deste modelo em relação à um conjunto de dados reais. Para isso, seria

[1]Detalhes sobre a ferramenta ScenGen podem ser encontrados na URL: http://isis.poly.edu/ qiming/scengen/index.html .

necessário o desenvolvimento de uma ferramenta que automatizasse o processo da escolha dos intervalos de cada parâmetro de um modelo de mobilidade específico, visto que na técnica de ajuste, apresentada na Seção 5.3, a escolha desses limites ainda depende do conhecimento do pesquisador em relação ao modelo investigado. Esta ferramenta é um importante tópico de pesquisa e, por isso, será um dos desdobramentos futuros da presente tese de doutorado.

Como mencionado anteriormente, cada modelo de mobilidade foi simulado diversas vezes variando os valores de seus parâmetros. Por exemplo, o modelo RWP foi simulado 9.601 vezes, o nosso modelo MMIG 13.883 vezes, o modelo *Levy-walk* 7.832 vezes e o modelo *Smooth* 2.597 vezes. Após a execução de todas as simulações, o valor dos parâmetros de cada modelo que apresentou o menor MSE, quando comparado a distribuição da velocidade, aceleração e ângulo de direção, são mostrados na Tabela 5.1.

5.4.3 Resultados Obtidos

Os valores dos componentes velocidade, aceleração, ângulo de mudança de direção e o tempo de pausa, dos dados reais apresentados no Capítulo 4, foram obtidos através da proposta de caracterização apresentada no Capítulo 3.

Os modelos de mobilidade foram ajustados através do método apresentado na Seção 5.3 e depois foi aplicada, aos dados sintéticos obtidos, a proposta de caracterização, descrita no Capítulo 3. A partir desses valores foram computadas as seguintes medidas de cada componente: média, variância, desvio padrão, coeficiente de variação, valor mínimo, valor máximo e a quantidade de amostras. Esses valores são mostrados nas Tabelas 5.2 e 5.3.

Como mencionado na Seção 4.1.3, é importante investigarmos as características das funções de distribuições dos componentes da mobilidade. Deste modo, a função distribuição cumulativa empírica para cada componente dos dados reais e dos modelos foram obtidas e serão mostradas a seguir.

Tabela 5.1: Parâmetros dos modelos de mobilidade ajustados pelo algoritmo proposto

Modelo Browniano			**Modelo MMIG**		
vel_min	*vel_max*	ângulo	*m*	*vel_max*	*base*
0 m/s	2,29 m/s	[0, 2Π]	0,4	1,9 m/s	1,028

RWP	**Modelo Smooth**		
vel_min	vel_pref1	vel_pref2	vel_pref3
1,52 m/s	1,1 m/s	1,6 m/s	0,1 m/s
vel_max	p_vel_pref1	p_vel_pref2	p_vel_pref3
1,58 m/s	0,6	0,1	0,3
t_pausa	p_mud_vel	p_mud_dir	
0 sec	0,1	0,6 m/s^2	

Modelo Levy-walk				
α	β	*mu*	*num_step*	*max_x*
0,61	1,94	0	10000	800
max_y	*f_min*	*f_max*	*s_min*	*s_max*
600	5	50	0	1
fl_scale	*pt_scale*	*duration*	*time_size*	*b_c*
10	1	1.610	1	2

Na Figura 5.2, é mostrada a distribuição cumulativa empírica da velocidade dos dados reais e dos modelos Browniano, *Levy-walk*, MMIG, RWP e *Smooth*. Através de uma análise visual nesta figura, pode-se observar que os modelos que mais se aproximaram dos dados reais foram o Browniano, MMIG e o *Smooth*. Entretanto, como a velocidade do Browniano seguiu uma distribuição uniforme, pode-se dizer que ele não é adequado.

Já o comportamento da distribuição cumulativa empírica da aceleração dos dados reais e sintéticos são apresentados na Figura 5.3 e pode-se dizer que a aceleração do modelo MMIG foi a que mais se aproximou dos dados reais. Além disso, é importante frisar que o modelo *Levy-walk* que é considerado um modelo realista não

Tabela 5.2: Medidas para cada componente do movimento real e dos modelos *Smooth* e Browniano

Dados Reais				
Medidas	Vel. (m/s)	Acel. (m/s^2)	Ângulo (°)	T. de pausa (s)
Média	1,127	0,0004	34,3313	3,6227
Variância	0,2835	0,0473	1.854,5554	37,0564
Desvio Padrão	0,5324	02175	43,0645	6,0874
C. de Variação	0,4724	576,0821	1,2544	1,6803
V. Mínimo	0,007	-1,19796	0,000089	1
V. Máximo	2,499921	1,185976	179,9868	106
# de Amostras	39.617	39.617	39.617	1.092
Modelo *Smooth*				
Medidas	Vel. (m/s)	Acel. (m/s^2)	Ângulo (°)	T. de pausa (s)
Média	0,8453	0,0014	55,2986	13,1414
Variância	0,2618	0,017	3.505,1762	1792935
Desvio Padrão	0,5116	0,1303	59,2045	13,3901
C. de Variação	0,6053	95,5681	1,0706	1,0189
V. Mínimo	0,099998	-1,542270	0,000001	1
V. Máximo	1,600036	1,000010	179,3349	86
# de Amostras	58.604	58.604	58.604	1.344
Modelo Browniano				
Medidas	Vel. (m/s)	Acel. (m/s^2)	Ângulo (°)	T. de pausa (s)
Média	1,1449	0,0001	89,8472	1,1485
Variância	0,4360	0,8694	2.704,9382	0,1736
Desvio Padrão	0,6603	0,9324	52,009	0,4166
C. de Variação	0,5767	7.521,2638	0,5789	0,3627
V. Mínimo	0,000001	-2,279758	0,000001	1
V. Máximo	2,289885	2,79717	179,9995	5
# de Amostras	58.604	58.604	58.604	6.585

Tabela 5.3: Medidas para cada componente dos modelos RWP, MMIG e *Levy-walk*

Modelo RWP				
Medidas	Vel. (m/s)	Acel. (m/s^2)	Ângulo $(°)$	T. de pausa (s)
Média	1,2206	0,0002	109,7572	1,1912
Variância	0,3391	0,0006	2.570,2610	0,1868
Desvio Padrão	0,5823	0,0244	50,6977	0,4322
C. de Variação	0,4771	114,6670	0,4619	0,3628
V. Mínimo	0,200056	-1,024398	0,070285	1
V. Máximo	2,199518	0,066243	180	3
# de Amostras	1.863	1.863	1.863	68
Modelo MMIG				
Medidas	Vel. (m/s)	Acel. (m/s^2)	Ângulo $(°)$	T. de pausa (s)
Média	1,5448	0,0011	11,5109	1,0123
Variância	0,0418	0,0386	388,5941	0,0123
Desvio Padrão	0,2044	0,1964	19,7128	0,1111
C. de Variação	0,1323	173,1358	1,7125	0,1098
V. Mínimo	0,333333	-0,565144	0,000001	1
V. Máximo	1,813231	1,121587	180	2
# de Amostras	59.800	59.800	59.800	81
Modelo *Levy-walk*				
Medidas	Vel. (m/s)	Acel. (m/s^2)	Ângulo $(°)$	T. de pausa (s)
Média	1,0555	0,00001	29,8557	1,0881
Variância	0,0065	0,0002	192,9430	0,2127
Desvio Padrão	0,0807	0,.0143	13,8904	0,4612
C. de Variação	0,0764	538,8026	0,4653	0,4239
V. Mínimo	0,0475	-0,06632	0,000001	1
V. Máximo	2,6530	0,7996	171,8024	12
# de Amostras	55.292	55.292	55.292	4.096

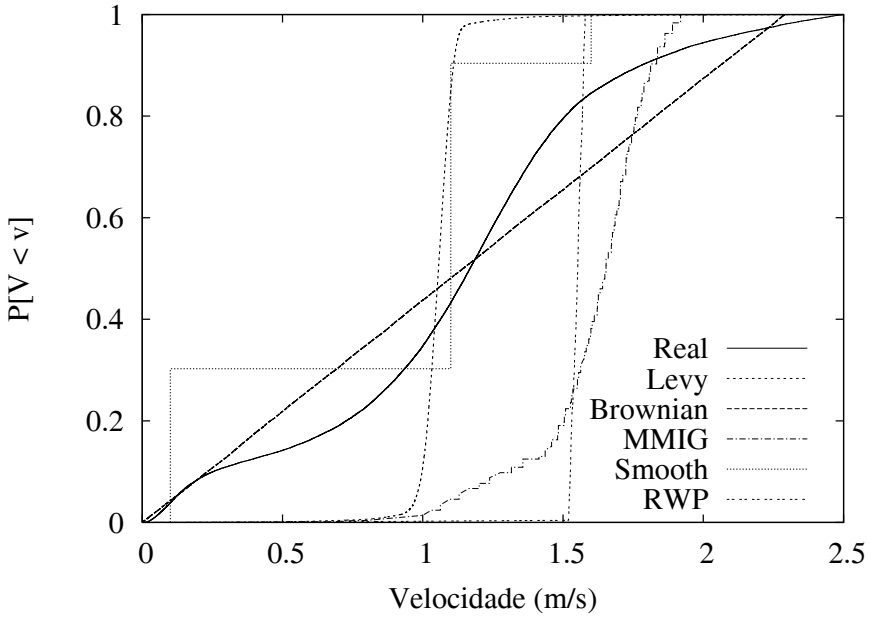


Figura 5.2: Distribuição cumulativa empírica da velocidade dos dados reais e dos modelos Browniano, MMIG, *Levy-walk*, RWP e *Smooth*.

apresentou evidências fortes desse realismo para os componentes velocidade e aceleração. Logo, os resultados obtidos para estes componentes reforçam a afirmação recentemente feita em [100] de que o modelo *Levy-walk* não representa adequadamente a mobilidade humana.

O ângulo de mudança de direção nos modelos de mobilidade também deve ser investigado, visto que este indica o comportamento da direção do movimento. Diferentemente do comportamento zigue-zague da direção dos modelos aleatórios, o ângulo de direção dos dados reais apresentou uma variação suave e pequena. Isto pode ser identificado através de sua curva mostrada na Figura 5.4, e pode-se observar que a maioria dos valores para essa medida ficou entre 10° e 40°. Além disso, entre os modelos analisados também através desta medida, o *Levy-walk* e o MMIG foram os que se aproximaram mais dos dados reais, pois foram os que obtiveram menor MSE.

O tempo de pausa é uma outra medida de interesse a ser analisada, visto que ela afeta o desempenho dos protocolos de roteamento das MANETs, como pode ser

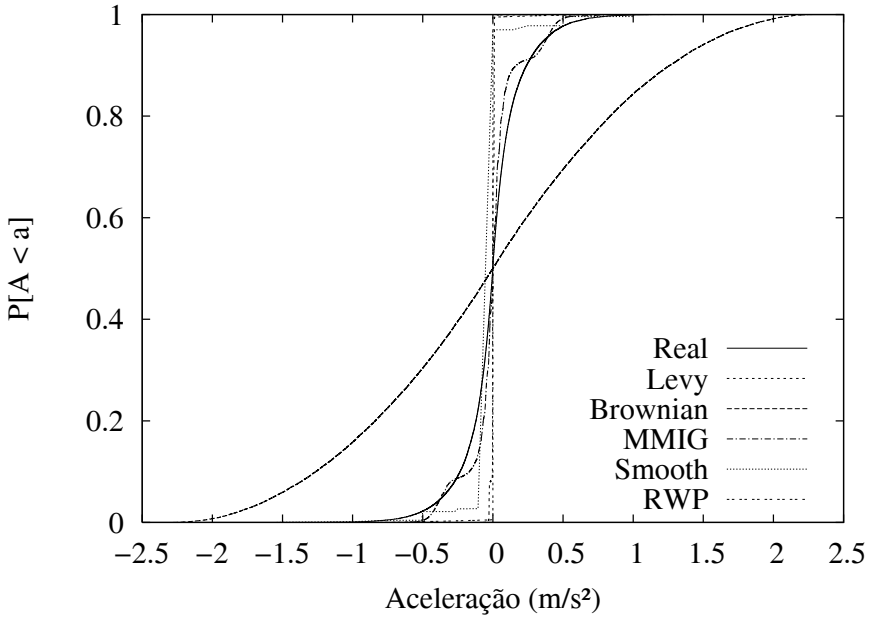


Figura 5.3: Distribuição cumulativa empírica da aceleração dos dados reais e dos modelos Browniano, MMIG, *Levy-walk*, RWP e *Smooth*.

visto em [79, 32].

Assim, na Figura 5.5 é apresentada a distribuição cumulativa empírica do tempo de pausa da mobilidade humana e dos modelos de mobilidade ajustados pelo algoritmo proposto na Seção 5.3. Através desta figura, pode-se observar que nenhum dos modelos apresentou um comportamento próximo dos dados reais. Um motivo para o ocorrido é que como esta medida não foi configurada diretamente em todos os modelos, o ajuste da mesma tornou-se mais difícil.

Com o objetivo de investigar a ocorrência de dependências temporais nos componentes do movimento real e dos modelos de mobilidade, a seguir são apresentadas as autocorrelações desses componentes.

Na Figura 5.6, é mostrada a autocorrelação da velocidade e podemos observar uma alta correlação, nos intervalos de até 10 segundos entre observações, desta medida. Deste modo, pode-se dizer que o componente velocidade apresentou uma alta dependência temporal. Isso também ocorreu nos modelos MMIG, *Smooth* e *Levy-walk*, sendo mais forte neste último, mostrando assim, que esses modelos apre-

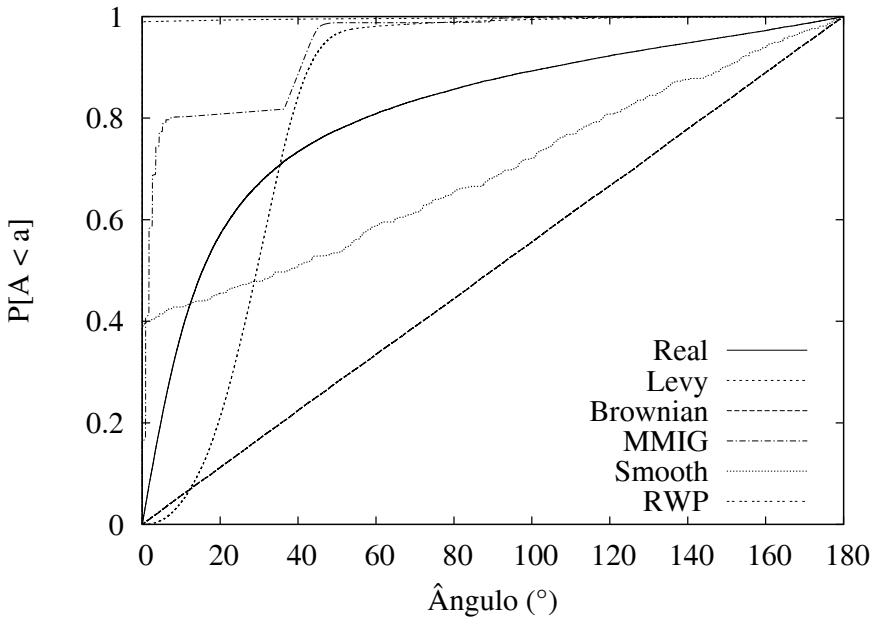


Figura 5.4: Distribuição cumulativa empírica do ângulo de direção dos dados reais e dos modelos Browniano, MMIG, *Levy-walk*, RWP e *Smooth*.

sentaram um comportamento próximo dos dados reais neste quesito.

A autocorrelação da aceleração é mostrada na Figura 5.7 e podemos ver que a autocorrelação apresentou um valor próximo de zero, tanto para os dados reais quanto para os modelos de mobilidade, o que envidencia uma descorrelação no tempo do componente aceleração.

A autocorrelação do ângulo de mudança de direção dos dados reais, ilustrada na Figura 5.8, apresentou um valor moderado. Isso indica que as mudanças de direção das pessoas no cenário avaliado foi suave, diferentemente das mudanças bruscas que ocorreram nos modelos aleatórios. Entre os modelos avaliados, o *Levy-walk* e o MMIG foram os que também mostraram esse comportamento.

Na Figura 5.9, a autocorrelação do tempo de pausa é apresentada e podemos dizer que ela foi fraca e aproximou-se de zero rapidamente, tanto nos dados reais quanto nos modelos de mobilidade. Isso indica a ausência de dependências temporais na medida tempo de pausa do movimento investigado.

Uma outra investigação realizada nesta tese, é a verificação da existência de

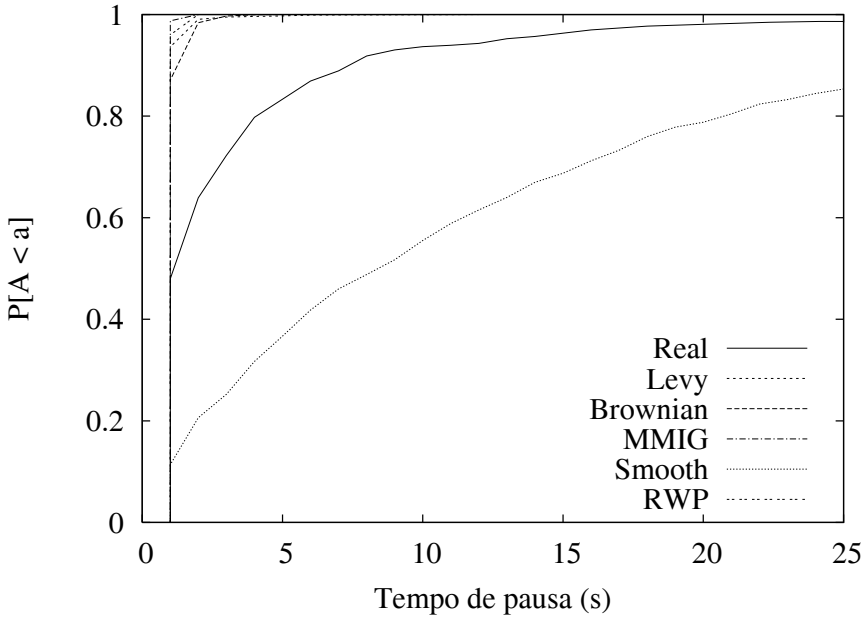


Figura 5.5: Distribuição cumulativa empírica do tempo de pausa dos dados reais e dos modelos Browniano, MMIG, *Levy-walk*, RWP e *Smooth*.

alguma relação entre os componentes velocidade e ângulo de direção do movimento de uma pessoa, em um instante de tempo, ou seja, será que existe alguma relação entre esses componentes?

Para responder este questionamento é apresentado, na Figura 5.10, o gráfico de dispersão de pontos que indicam a relação entre o ângulo de direção e a velocidade do movimento, para os experimentos reais e simulados pelos modelos de mobilidade ajustados. A novidade deste resultado é a identificação de relação entre velocidades (0,75 a 1,75 m/s) e ângulos de até 40° na mobilidade humana (vide Figura 5.10(a)). Assim, pode-se dizer que houve uma concentração de ocorrências neste conjunto de valores. Isso pode ser observado, de maneira mais acentuada, nos modelos *Levy-walk* (Figura 5.10(e)) e MMIG (Figura 5.10(d)) para um conjunto menor de valores. Já os outros modelos não apresentaram este tipo de concentração, como pode ser visto nas Figuras 5.10(b), (c) e (f).

Com o objetivo de responder às perguntas apresentadas na Seção 5.2, pode-se dizer que o modelo que mais se adequou ao cenário avaliado não foi um único

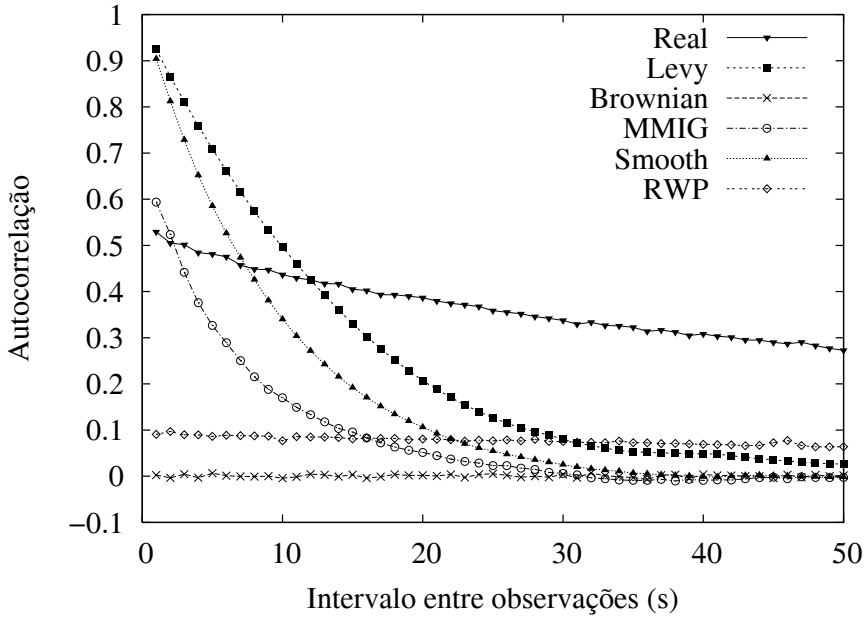


Figura 5.6: Autocorrelação do componente velocidade da mobilidade real e da sintética.

modelo, e sim, dois modelos: o *Levy-walk* e o MMIG, dependendo do componente ou medida analisada. Além disso, é importante mencionar que o ajuste dos modelos à um cenário real depende do valor limitante dos parâmetros de cada modelo e que os resultados obtidos são específicos para cada cenário, não podendo ser utilizados de maneira geral. Uma maneira de contornar essa limitação, seria o desenvolvimento de uma ferramenta *software* que automatize o processo da escolha dos valores limites de cada parâmetro de um modelo. Esta ferramenta é um outro tópico dos trabalhos futuros.

5.5 Conclusões

Neste capítulo foi proposta uma técnica de ajuste dos modelos de mobilidade em relação aos dados de movimentação real, com o objetivo de gerar simulações de movimento mais adequadas que as que vêm sendo realizadas pela comunidade científica. Para isso, foi apresentado um algoritmo que identifica os melhores valores para os

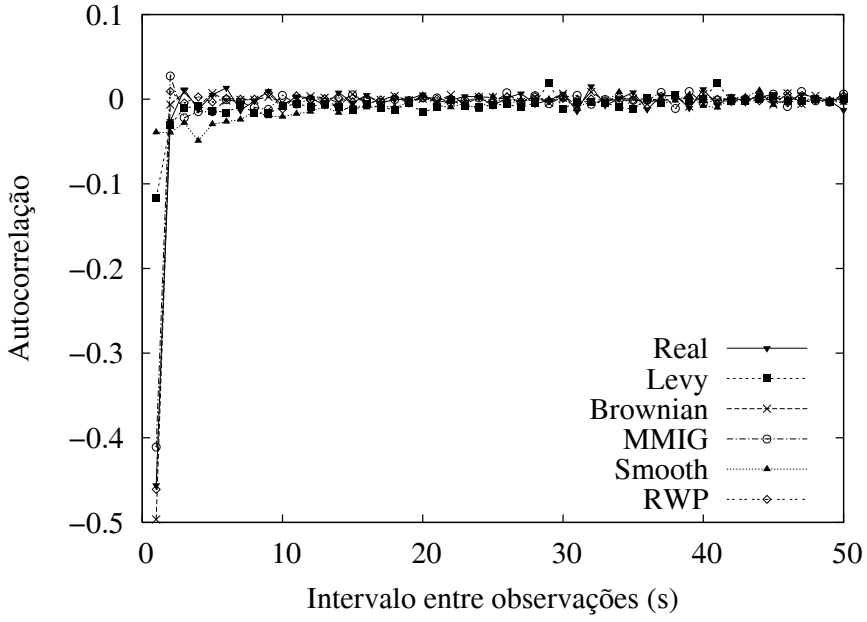


Figura 5.7: Autocorrelação do componente aceleração da mobilidade real e da sintética.

parâmetros de um modelo de mobilidade, através da minimização do erro quadrático médio dos componentes desse modelo em comparação com os componentes de um movimento real. Além disso, diferentes modelos de mobilidade foram investigados em relação a uma mobilidade humana capturada em um cenário real e informações sobre a velocidade, aceleração, ângulo de direção e do tempo de pausa foram obtidas e apresentadas. Importantes resultados sobre a autocorrelação dos componentes do movimento e sobre a relação entre a velocidade e o ângulo de mudança de direção foram também obtidos. Através desses resultados pode ser verificado que os modelos que mais se aproximaram dos dados reais foram o *Levy-walk* e, principalmente, o MMIG. Mostrando assim, a capacidade de ajuste deste modelo Markoviano na representação da mobilidade humana para o cenário investigado.

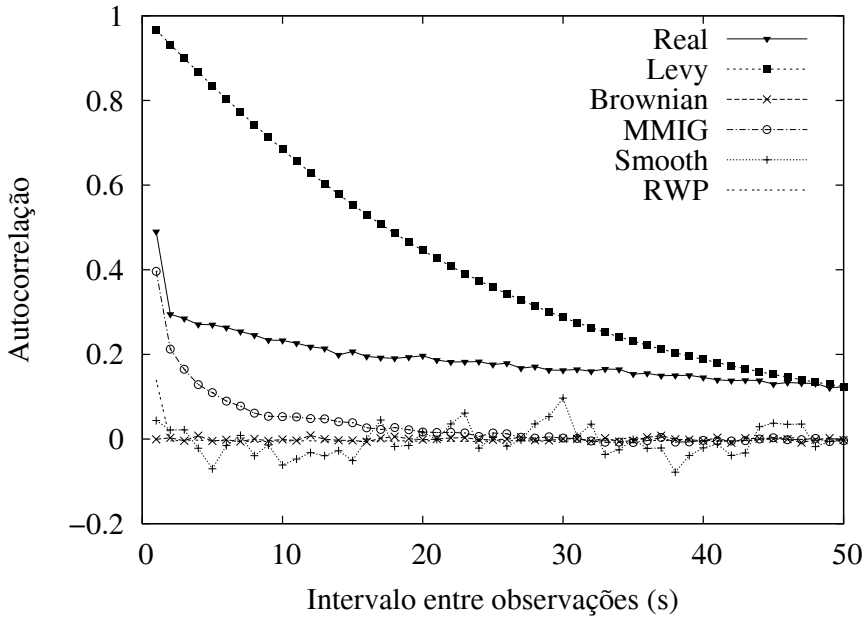


Figura 5.8: Autocorrelação do componente ângulo de direção da mobilidade real e da sintética.

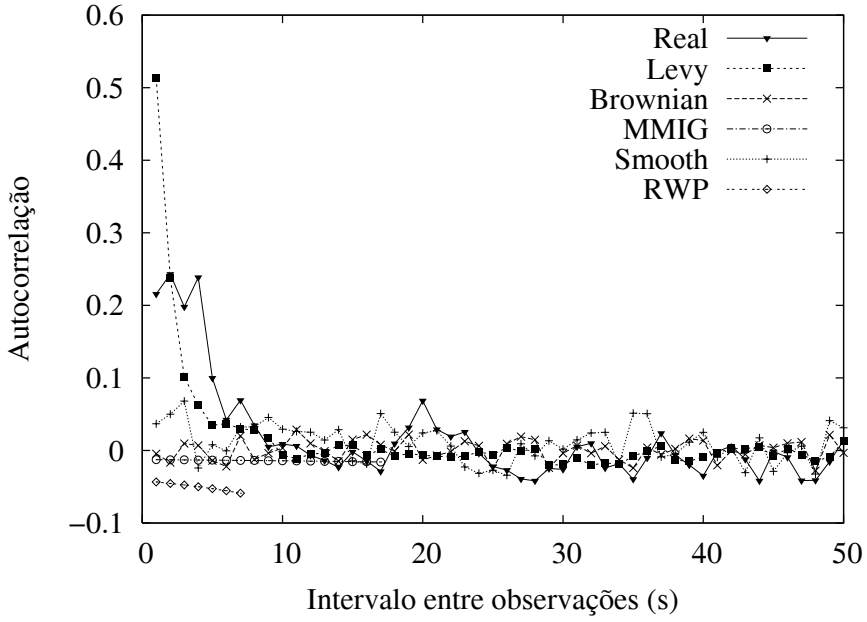
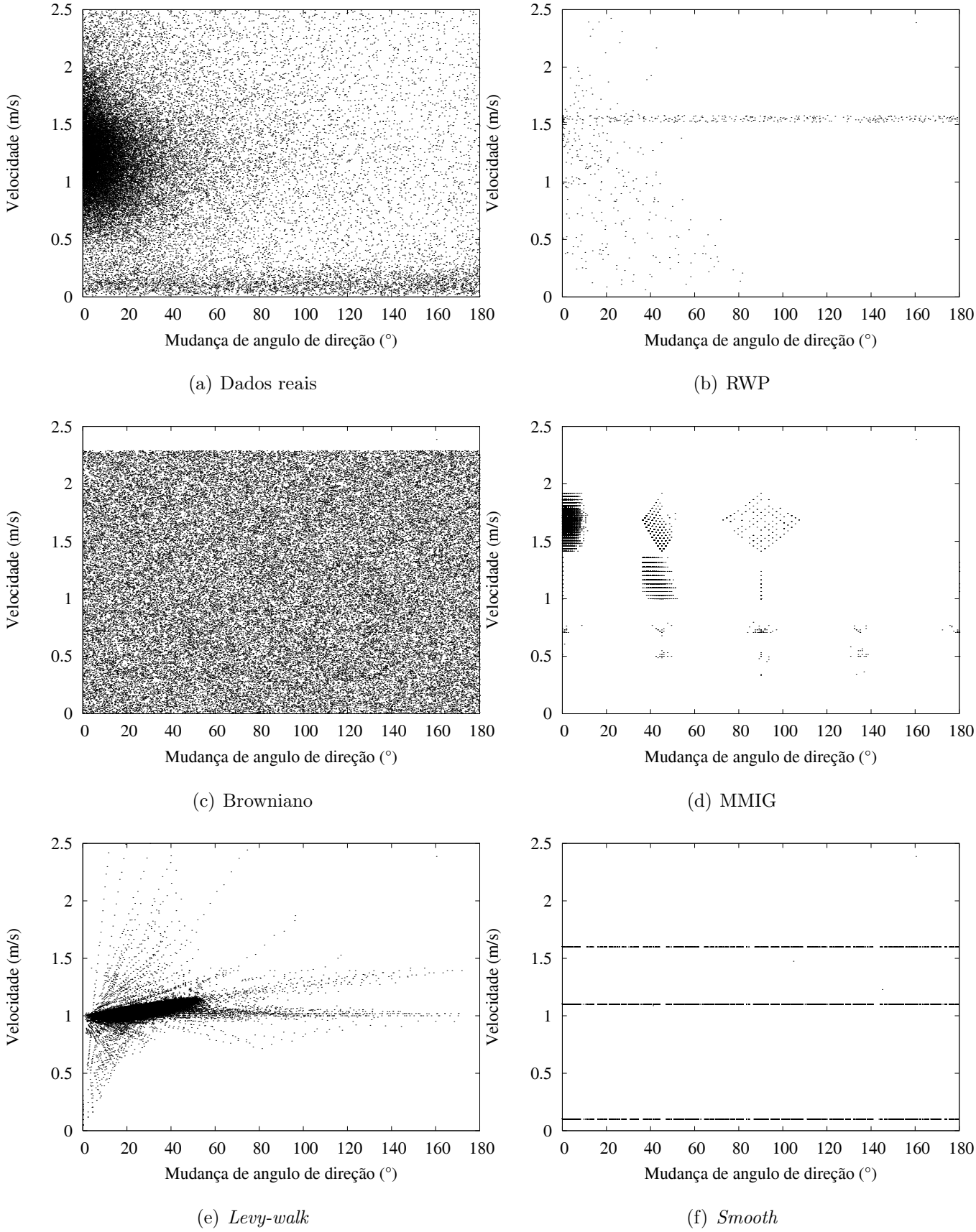


Figura 5.9: Autocorrelação da medida tempo de pausa na mobilidade real e da sintética.



(a) Dados reais

(b) RWP

(c) Browniano

(d) MMIG

(e) *Levy-walk*

(f) *Smooth*

Figura 5.10: Gráfico de dispersão dos pontos que indicam a relação entre o ângulo de direção α e a velocidade v de um nó, capturados no instante $t \in [0, 600]$ segundos, para cada conjunto de experimentos reais e simulados pelos modelos de mobilidade.

Capítulo 6

Uma Avaliação das Redes Tolerantes a Atrasos e Desconexões sob o Impacto da Mobilidade Real e Sintética

AS redes tolerantes a atrasos e desconexões (*Delay Tolerant Networks - DTNs*) caracterizam-se pelas suas conexões intermitentes. A movimentação dos usuários é uma das causas dessa intermitência. Assim, avaliar essas redes sob a influência da mobilidade real é cada vez mais importante. Neste capítulo é apresentada uma avaliação de desempenho, via simulação, das DTNs sob a influência da mobilidade real, descrita no Capítulo 4, e dos modelos de mobilidade ajustados, descritos no Capítulo 5. Como resultados dessa avaliação foram obtidas as distribuições do tempo de contato e do tempo entre contato dos usuários. Além disso, os protocolos de roteamento foram avaliados e os resultados obtidos indicaram que o desempenho destes protocolos, quando influenciados pela mobilidade real, é bastante diferente ao ser comparado com os resultados usando modelos de mobilidade.

6.1 Introdução

As DTNs provêem um ambiente repleto de desafios, onde a comunicação entre os nós é intermitente. Isso significa que a conexão entre os nós nessas redes, pode não existir em um determinado intervalo de tempo. Assim, quando um nó está desconectado, o mesmo armazena as suas mensagens e as repassa através de conexões oportunísticas estabelecidas posteriormente.

Aplicações para este tipo de rede são diversas, como por exemplo: redes de mobilidade terrestre, onde particionamentos podem ocorrer devido à interferência no sinal; redes que utilizam meios não comuns, como as transmissões no espaço, onde os sistemas são sujeitos a grandes latências e interrupções [106]. Em relação às redes com mobilidade terrestre e aplicações semelhantes, o modo como ocorre o movimento dos nós pode ser um fator importante no funcionamento desse tipo de DTN. Para a representação dessa movimentação podem ser utilizados os modelos de mobilidade. Como mencionado nos capítulos anteriores desta tese, esses modelos vem sendo criticados pela comunidade científica. Assim, é importante analisar as DTNs em um cenário real de movimentação de pessoas para responder as seguintes perguntas.

1. **Como seria o funcionamento de uma DTN em um cenário de mobilidade real?**
2. **Os modelos de mobilidade influenciam o desempenho de uma DTN da mesma maneira que a mobilidade real?**
3. **Como se comporta o desempenho de um protocolo de roteamento sob diferentes tipos de mobilidade?**

O objetivo deste capítulo é responder completamente, ou parcialmente, todas essas perguntas. Dessa maneira, foi utilizado o conjunto de experimentos de captura da mobilidade humana, descritos no Capítulo 4, para avaliar essas redes visto que o cenário a ser analisado é uma área de lazer que, pode ser utilizada tanto para atividades físicas, quanto para estudo e pesquisa. Como a mobilidade dos nós (pessoas)

e a conectividade da rede se modifica com o passar do tempo, analisar esses *traces* como sendo nós de uma rede móvel sem fio como, por exemplo, as DTNs, será o foco deste capítulo.

Por meio dos dados dessa mobilidade humana foi realizada uma avaliação de desempenho, via simulação, onde os resultados obtidos através dessa mobilidade são comparados com os obtidos sob os modelos de mobilidade (Browniano, *Levy-walk*, MMIG, RWP, *Smooth*), que foram ajustados através da técnica apresentada no Capítulo 5. Essa avaliação foi feita através de métricas baseadas no encontro físico dos nós e de três protocolos de roteamento para DTN. Por fim, importantes resultados foram obtidos com o intuito de entender o impacto da mobilidade nessas redes e para responder as perguntas apresentadas acima. Uma versão preliminar dessa avaliação de desempenho foi apresentada em [51].

6.2 Trabalhos Relacionados

O roteamento nas DTNs é caracterizado pela forma de trocar as mensagens ou encaminhá-las a cada contato. Assim, os protocolos de roteamento podem ser classificados em encaminhadores e replicadores [107]. Os protocolos encaminhadores como, o PROPHET [108], o MEED [109] e o MaxProp [110], escolhem quais mensagens serão transmitidas, e os replicadores, que têm como exemplo, o Epidêmico [111], RAPID [112] e o *Spray and Wait* [113], repassam cópias de suas mensagens em cada contato. Recentemente, Zhang [114] apresenta um tutorial sobre o roteamento em MANETs com conexões intermitentes e em DTN, nas quais, os protocolos de roteamento são categorizados na abordagem determinística (onde a topologia da rede é determinística e conhecida ao longo do tempo) e na abordagem estocástica (onde a topologia da rede é aleatória e não conhecida). A seguir, os principais trabalhos relacionados com o roteamento e com a avaliação de desempenho das DTNs serão descritos.

No trabalho [111], os autores propõem o protocolo Epidêmico, onde o roteamento é realizado pela própria mobilidade dos nós na DTN. Assim, quando um nó entra

no alcance de transmissão de outro nó é estabelecida uma conexão. Em seguida, os nós trocam suas listas de mensagens armazenadas. Deste modo, as mensagens da lista recebida é comparada com as mensagens presentes no nó, para determinar quais mensagens o nó não possui. Feito isso, o nó solicita o envio de cópias destas mensagens. O processo de troca de mensagens se repete toda vez que um nó estabelece contato com um novo nó, o que permite que as mensagens sejam rapidamente distribuídas pela rede. Assim, quanto mais cópias de uma mesma mensagem forem encaminhadas na rede, maior será a probabilidade desta mensagem ser entregue e menor será o atraso.

O protocolo PROPHET (*Probabilistic ROuting Protocol using History of Encounters and Transitivity*) proposto por Lindgren e outros [108], utiliza o mesmo princípio de troca de mensagens no protocolo Epidêmico. Quando dois nós estabelecem uma conexão, eles trocam as suas listas de mensagens. A diferença é que nesta lista existe um parâmetro novo para cada mensagem da lista. Esse parâmetro corresponde à probabilidade de cada nó a entregar mensagens para um destino conhecido b ($P_{(a,b)} \in [0,1]$). O valor de $P_{(a,b)}$ aumenta sempre que a e b se encontram e diminui se a e b deixam de se encontrar freqüentemente. 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 do vizinho, ele calcula a probabilidade de entrega para cada mensagem que ainda não possui. Em seguida, para cada mensagem, 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. Após essa comparação, três procedimentos serão realizados: (i) o nó deve enviar um pedido das mensagens não armazenadas que possuem uma maior probabilidade de serem entregues através dele; (ii) recebe o pedido de mensagens do vizinho e as envia; e (iii) apaga todas as mensagens que o vizinho tem maior probabilidade de entregar. No final, cada nó possuirá somente mensagens cujas probabilidades de entrega sejam maiores através dele.

Já o protocolo *Spray and Wait* (SW), apresentado por Spyropoulos e outros

[113], combina a velocidade do protocolo Epidêmico, com a simplicidade de um envio direto (*direct transmission*) para o nó destino. Este protocolo possui duas fases, na primeira, chamada de *Spray*, para cada mensagem gerada no nó origem, L cópias desta mensagem são repassadas para outros $L - 1$ nós. Se o nó destino não foi alcançado nesta fase, o protocolo entra na fase de espera, chamada *Wait*, onde os L nós que contém cópias da mensagem, irão repassá-las somente para o nó destino. Uma otimização deste protocolo, bastante utilizada, é chamada de *binary Spray and Wait*. Nessa otimização, cada nó se possuir $n > 1$ cópias da mensagem (onde n é o número de cópias de uma mensagem contida em um nó), irá repassar $\lfloor n/2 \rfloor$ e manterá $\lceil n/2 \rceil$ cópias da mensagem consigo, até o nó possuir apenas uma cópia da mensagem ($n = 1$), quando entrará na fase *Wait*.

Como mencionado no início desta seção, já existem algumas dezenas de protocolos de roteamento para as DTNs. Entretanto, não basta propor um novo protocolo, mas sim propor e avaliar o seu desempenho sob diferentes contextos. Assim, vários trabalhos relacionados com a avaliação de desempenho do roteamento para as DTNs serão descritos a seguir.

Algumas técnicas de encaminhamento de dados foram propostas com base em nós especiais que se movem para aumentar a capacidade de entrega das mensagens nas DTNs, conhecidas como: *data mules* [115], *message ferries* [33] e *throwboxes* [92, 116].

No artigo [117] é apresentada uma avaliação das DTNs sobre o impacto dos modelos de mobilidade em grupo baseados em redes sociais. Assim, métricas de desempenho como, taxa de ocupação dos *buffers* e sobrecarga do roteamento na largura de banda, foram avaliadas. Entretanto, algumas hipóteses não realistas são assumidas como, *buffer* e largura de banda infinita, nenhuma perda na Camada Física e a não utilização de mobilidade real.

Uma outra avaliação de protocolos de roteamento é apresentada em [118], onde também foi proposta uma nova técnica de roteamento baseada em características das redes sociais e complexas. Além disso, foi mostrado que o protocolo PROPHET possui falhas em cenários de poucos nós e a mobilidade foi baseada nos arquivos

de *log* das chamadas telefônicas de celulares. Em [119], uma metodologia de estimação dos parâmetros de configuração dos protocolos (PROPHET e MaxProp) é apresentada para diferentes escalas de tempo. Nesse trabalho é mostrado que a configuração desses parâmetros para simulações com períodos de tempo pequenos (10^2 ou 10^3 segundos) deve ser diferente dos valores usados nas simulações com durações de 10^5 ou 10^8 segundos. Uma avaliação baseada em *traces* reais de mobilidade é realizada em [120] para verificar o desempenho do protocolo NECTAR, que realiza o roteamento baseado no histórico do contato entre os vizinhos em uma DTN, em relação aos protocolos Epidêmico e PROPHET.

Em [121] é realizada uma avaliação de vários protocolos de roteamento em um cenário de larga escala contendo aproximadamente 5.100 nós. Nesta avaliação, várias métricas foram investigadas e importantes resultados foram obtidos. Contudo, dados de mobilidade real não foram utilizados, mas sim, uma representação do movimento baseada na associação de clientes à pontos de acesso em uma WLAN. Uma outra avaliação das DTNs sob o impacto da mobilidade extraída de *traces* reais de redes sem fio é apresentada em [122]. Neste trabalho é proposto um esquema de roteamento eficiente para DTN baseado no padrão de mobilidade dos nós chamado de MobySpace, onde este esquema se beneficia do padrão de mobilidade dos nós para a entrega dos dados.

Uma avaliação da influência de vários modelos de mobilidade, no funcionamento das DTNs, é descrita em [123]. Nesse trabalho foi verificado que a propriedade denominada de "comportamento super difuso" (*super-diffusive behavior*) dos modelos de mobilidade, leva a resultados variáveis (otimistas ou até pessimistas) no desempenho das DTNs. Assim, o efeito dessa propriedade deve ser investigado para que as avaliações realizadas sejam confiáveis. Em [124], é apresentado um importante estudo sobre a relação da distribuição do tempo entre contatos, obtidos a partir da mobilidade humana capturada, e algumas métricas de desempenho das DTNs. Vários resultados são obtidos, tais como, a aproximação do tempo entre contatos dos nós à uma distribuição Pareto truncada; e a aproximação do tempo entre contatos do modelo *Levy-walk* aos da mobilidade humana capturada. Este artigo foi um dos motivadores da presente avaliação que será apresentada na Seção 6.4.

Como a DTN é uma rede peculiar contendo diversos desafios, avaliar o desempenho desta rede é importante para se mensurar a qualidade da comunicação dos seus usuários. O estudo sobre o consumo de energia, por exemplo, é importante pois pode refletir diretamente no roteamento e na taxa de entrega dos pacotes da DTN, por outro lado, o número de saltos que um pacote executa até o destino afeta diretamente o consumo de energia dos nós. Outro estudo importante é a quantidade de mensagens no *buffer* dos nós, o que pode causar perda de mensagens, podendo impactar diretamente a taxa de entrega de mensagens e que é outra métrica importante numa DTN. Porém, nesta tese estamos investigando somente o impacto da mobilidade real e sintética nessas redes, tanto no contexto do encontro dos nós, quanto no desempenho dos seus protocolos de roteamento. Como os contextos são diferentes, inicialmente os resultados para mobilidade serão apresentados e, por seguinte, os resultados para os protocolos de roteamento.

6.3 Um Estudo Sobre a Influência da Mobilidade no Encontro dos Nós

A avaliação do encontro dos nós é de grande importância numa DTN, pois dada a característica das conexões oportunísticas, a avaliação dessas conexões reflete nas características da rede e influencia diretamente o roteamento e a entrega das mensagens. Para avaliar essas características, as métricas mais usadas na literatura, são o tempo de contato e o tempo entre contatos [36, 125, 126]. Essas métricas serão definidas a seguir.

Sejam n_1 e n_2 nós 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 seja t_f, o instante em que os mesmos nós perderam o contato, onde $t_f > t_i$. Assim, o **tempo de contato (TC)** 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, $\text{TC} = t_f - t_i$.

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 $t_r > t_f$. Então, **tempo entre contatos (TEC)** 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 Características da Simulação

Para avaliar o encontro dos nós foram usados os registros da movimentação real descrita na Seção 4.1.1. Esses registros foram formatados[1] e inseridos como dados de entrada no simulador de DTN chamado *Opportinistic Network Environment - ONE* [127] - versão 1.3.0, que foi o simulador utilizado na avaliação de desempenho da DTNs realizada neste capítulo. Detalhes sobre as características deste simulador podem ser encontrados em [128].

A Figura 6.1 apresenta um *snapshot* da tela de interface deste simulador utilizando os registros de movimentação real como parâmetro de entrada. Além disso, para que sejam comparados os resultados dessa movimentação, foram utilizados como arquivos de entrada também no ONE, os modelos de mobilidade ajustados (ver Capítulo 5).

Os parâmetros escolhidos para representar o cenário físico, com base na movimentação real, foram: área de simulação de 600×800 m^2 contendo 100 nós, realização de 10 rodadas de simulação para cada cenário, com o tempo de simulação de 600 segundos após o descarte de 1.000 segundos para eliminar a fase transiente. As simulações utilizando os modelos de mobilidade tiveram os mesmos parâmetros, sendo que a configuração de cada modelo foi de acordo com os valores apresentados na Tabela 5.1.

As medidas TC e TEC foram obtidas supondo que o movimento das pessoas seja

[1] A formatação consistiu na filtragem de amostras contendo erros e na sincronização do tempo inicial dos *traces* em uma mesma simulação. O uso de *traces* sincronizados artificialmente é um passo intermediário entre os dados sintéticos (modelos de mobilidade) e a mobilidade real, capturada ao mesmo tempo, de pessoas portando dispositivos sem fio.

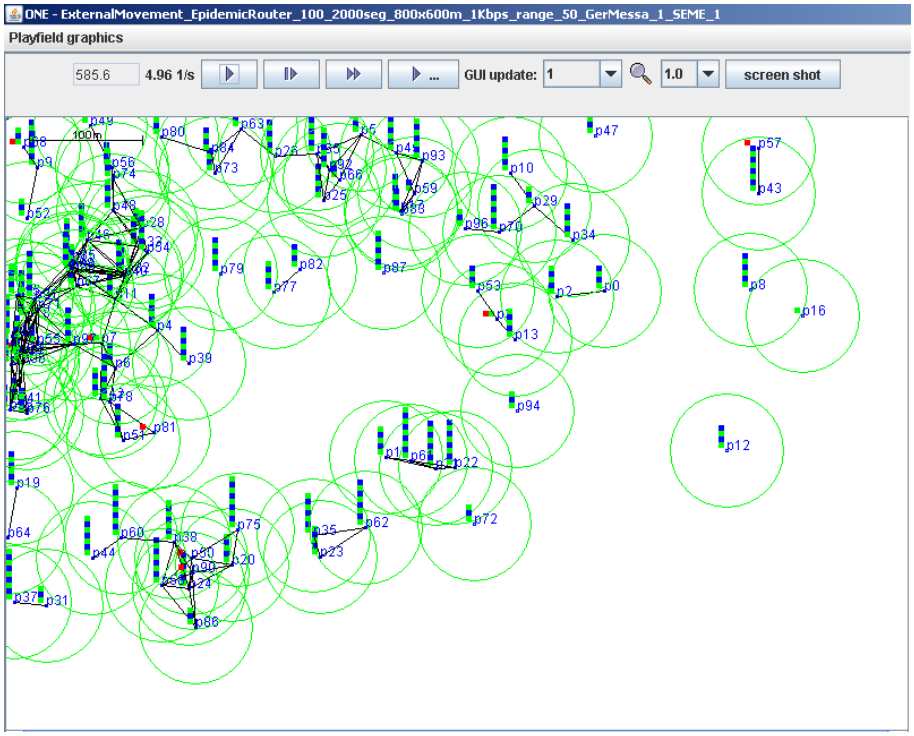


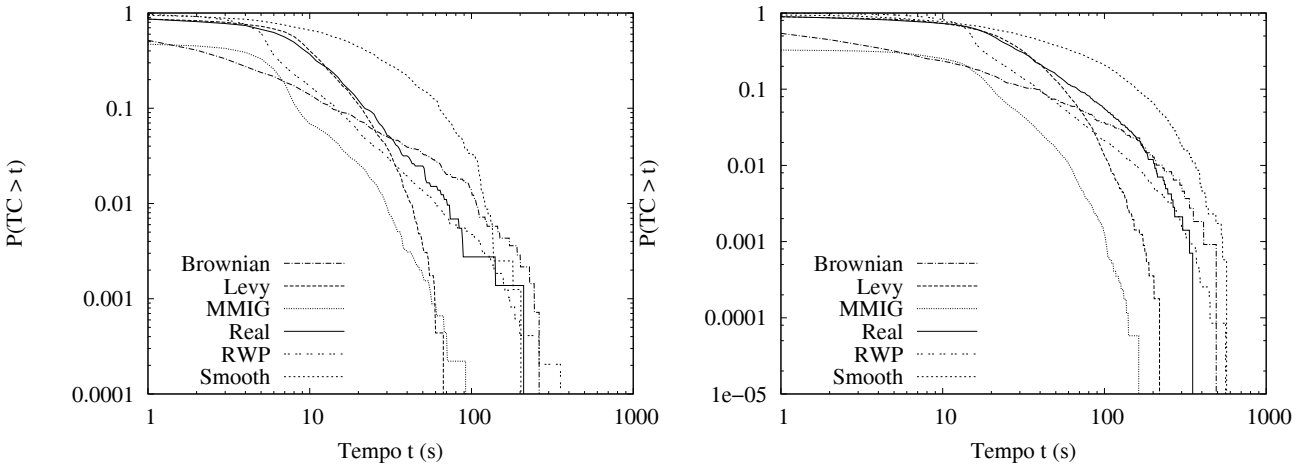
Figura 6.1: *Snapshot* da tela de interface do simulador ONE com base na mobilidade humana.

independente e que as mensagens trocadas não interfiram nesse movimento. Essas medidas serão mostradas a seguir.

6.3.2 Distribuição Cumulativa Complementar do Tempo de Contato - DCCTC

A análise da distribuição do TC nas DTNs é de suma importância, pois dada a característica de desconexão e do uso de conexões oportunísticas nessas redes, se o TC entre dois nós for pequeno, poucos pacotes serão trocados entre os nós, o que pode causar grandes atrasos na entrega das mensagens, enchimento total da memória (*buffer*) dos nós e, conseqüentemente, a perda das mensagens [36, 125]. Além disso, essa distribuição depende do tamanho do raio de transmissão dos nós, pois quanto maior o raio de transmissão, maior a probabilidade de eles estarem em contato. Para uma análise mais detalhada da cauda da distribuição do TC é

recomendado em [36, 125, 126]: usar a sua distribuição cumulativa complementar, analisar os dados de maneira agregada ou em pares [129], e plotar os gráficos em escala log-log para facilitar a análise da cauda dessa distribuição. Desta forma, o TC será mostrado e analisado através da DCCTC de maneira agregada e o gráfico será plotado em escala log-log.



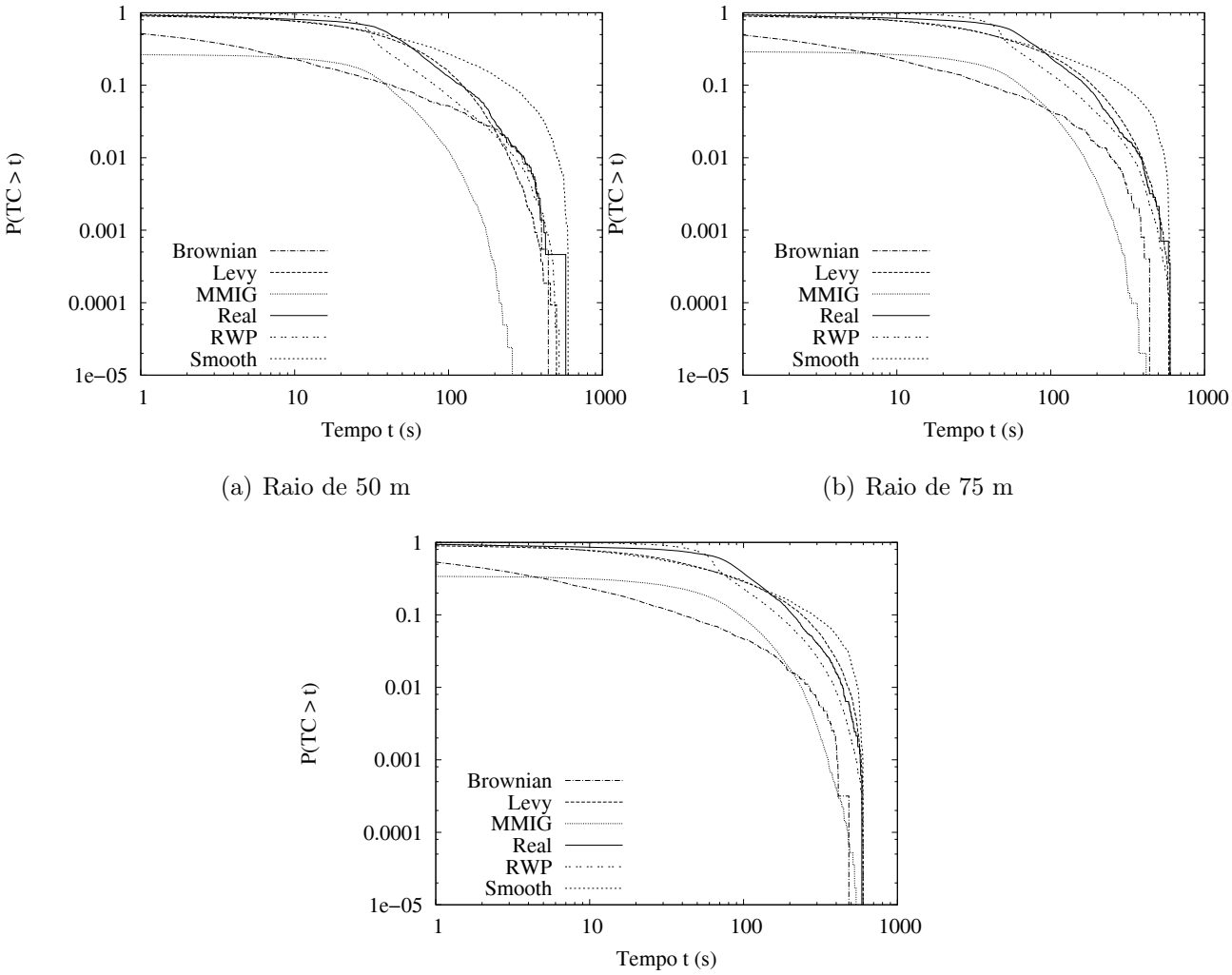
(a) Raio de 10 m

(b) Raio de 25 m

Figura 6.2: DCCTC da mobilidade real e sintética para o raio de transmissão de 10 e 25 metros.

As Figuras 6.2 e 6.3 apresentam a DCCTC para a mobilidade real e sintética (modelos: Browniano, *Levy-walk*, MMIG, RWP e *Smooth*) variando o raio de transmissão. Nas Figuras 6.2(a) e (b) e nas Figuras 6.3(a), (b) e (c) apresentam essa distribuição para o raio de transmissão de 10, 25, 50, 75 e 100 metros, respectivamente. Pode-se observar que a DCCTC do modelo *Levy-walk* foi a única que se ajustou à DCCTC da mobilidade real mesmo variando o tamanho do raio de transmissão. Esse é um importante resultado e que também foi observado em [123]. Já as DCCTCs dos modelos Browniano e MMIG foram muito diferentes dos dados reais. A partir da Figura 6.2(c) até a Figura 6.2(e), a DCCTC dos modelos *Levy-walk*, RWP e *Smooth* se aproximaram mais da DCCTC dos dados reais, ou seja, podemos observar que à medida que o raio aumenta, de 50 para 75 metros e principalmente para o raio de 100 metros, as distribuições tenderam a ficar parecidas, independente do modelo de mobilidade.

Além disso, verificamos que as DCCTCs da mobilidade real e de todos os modelos



(a) Raio de 50 m

(b) Raio de 75 m

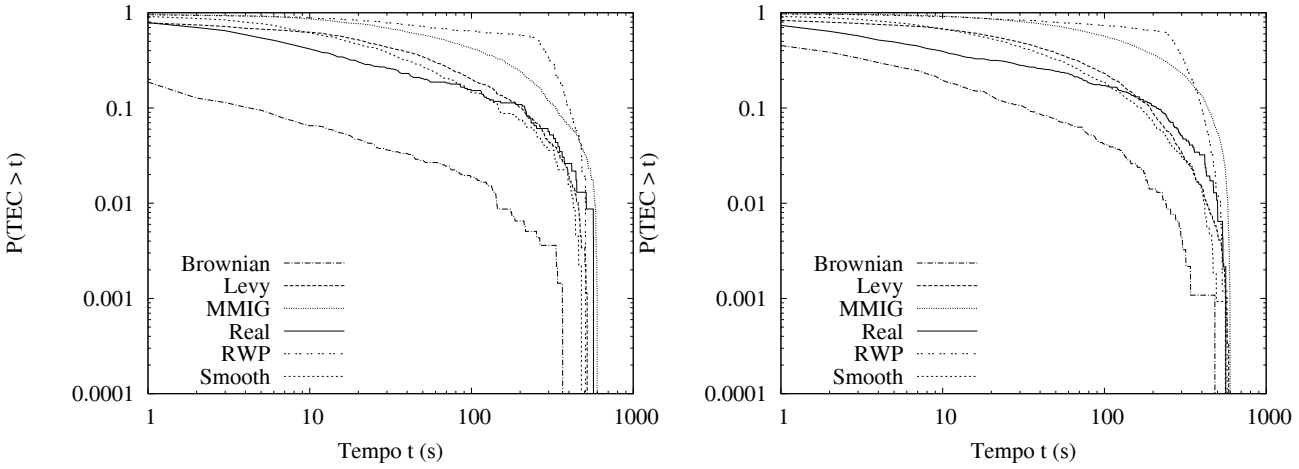
(c) Raio de 100 m

Figura 6.3: DCCTC da mobilidade real e sintética para o raio de 50, 75 e 100 metros.

de mobilidade para os tamanhos de raio analisados, apresentaram um decaimento exponencial na sua calda assim como observado na distribuição do tempo entre contato dos dados apresentados em [126]. Também foi verificado que o TC da mobilidade real e sintética não segue uma lei de potência, mesmo que truncando essa distribuição. Por fim, como era esperado o valor do TC aumentou à medida que o raio de transmissão também aumenta e isso aconteceu tanto para a mobilidade humana quanto na mobilidade sintética.

6.3.3 Distribuição Cumulativa Complementar do Tempo entre Contatos - DCCTEC

O TEC numa DTN caracteriza a freqüência na qual os dados podem ser transferidos entre dois nós da rede [36, 125, 126]. Esta medida também possui grande importância, pois se dois nós possuem um TEC pequeno, pode significar que eles trocam mensagens muitas vezes, o que pode acarretar uma perda de pacotes por transbordo do *buffer* de mensagens, dependendo do modo como as mensagens trafegam na rede. Já se esse tempo for elevado, significa que as mensagens que devem ser trocadas pelos dois nós devem passar por muitos outros nós, o que pode provocar muitas cópias das mensagens na rede e, conseqüentemente, o enchimento total do *buffer* de mensagens desses outros nós. Assim, o TEC será investigado através da sua DCCTEC de forma agregada e o gráfico será plotado também em escala log-log.



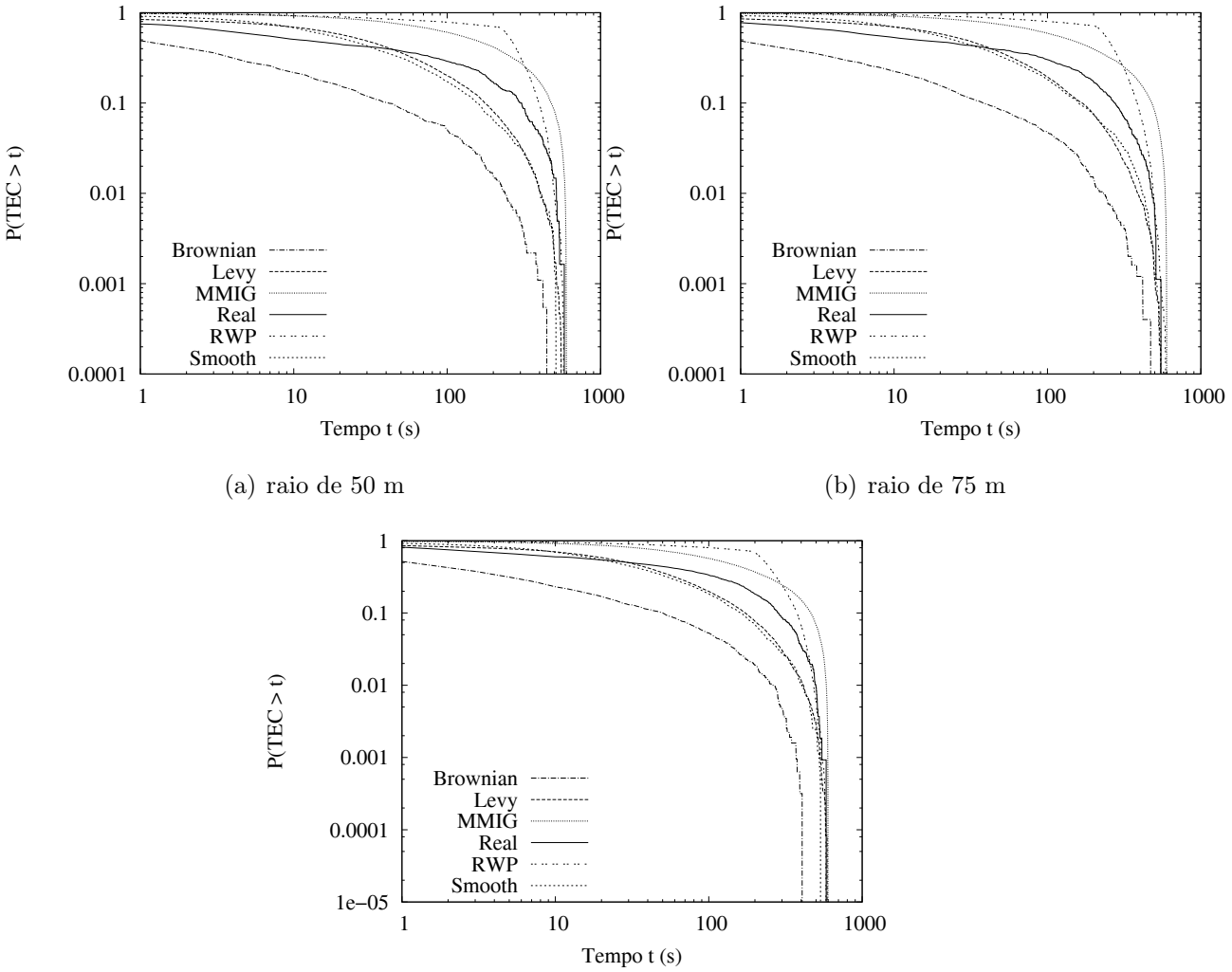
(a) raio de 10 m

(b) raio de 25 m

Figura 6.4: DCCTEC da mobilidade real e sintética para o raio 10 e 25 metros.

As Figuras 6.4 (a) e (b) apresentam a DCCTEC para a mobilidade real e sintética com os nós da rede contendo um raio de transmissão de 10 e 25 metros, respectivamente. Ja as Figuras 6.5(a), (b) e (c) apresentam essa distribuição para raios de 50, 75 e 100 metros, respectivamente.

Nas duas figuras acima, podemos observar que a DCCTEC dos modelos de mobilidade, principalmente, o Browniano, MMIG e RWP não se ajustaram à DCC-



(a) raio de 50 m

(b) raio de 75 m

(c) raio de 100 m

Figura 6.5: DCCTEC da mobilidade real e sintética para o raio de transmissão de 50, 75 e 100 metros.

TEC da mobilidade real, assim como ocorreu na DCCTC. A DCCTEC dos modelos *Levy-walk* e *Smooth* ficaram muito parecidas entre si mas, também diferenciaram da DCCTEC dos dados reais. Além disso, assim como ocorreu na DCCTC, a DCCTEC de todas as mobilidades e tamanhos de raio analisados, apresentou um decaimento exponencial na sua calda assim como observado na distribuição do tempo entre contato dos dados apresentados em [126]. Também foi verificado que a DCCTEC da mobilidade real e dos modelos não seguem uma lei de potência, mesmo que truncando essas distribuições, diferentemente do que foi observado em [36, 126] para o tempo entre contato dos dados analisados nesses trabalhos.

Uma diferença entre os dados analisados é em relação ao tempo de observação, visto que nesta tese o tempo observado foi de 6 x 10^2 segundos e nos trabalhos [36] e [126], esse tempo foi de (2,4 x 10^5 até 2 x 10^7) segundos e (2,5 x 10^6 até 1,5 x 10^7) segundos, respectivamente, dependendo do conjunto de experimentos. Como a lei de potência foi identificada na DCCTEC desses trabalhos para um tempo superior a 12 horas (4,3 x 10^4 segundos), isso pode explicar a inexistência deste comportamento (identificação de uma lei de potência) nas DCCTECs tanto da mobilidade real, quanto da mobilidade sintética, mostradas na Figura 6.4, pois o tempo total observado foi de 600 segundos. Além disso, diferentemente do que foi identificado no TC, não foi observado um aumento no TEC à medida que aumentou-se o raio de transmissão. Outra importante observação a ser feita, tanto na DCCTC quanto na DCCTEC, é que para valores pequenos de TC e de TEC (até 10 segundos), a diferença entre a mobilidade real e os modelos sintéticos é maior.

De acordo com as análises apresentadas acima, da DCCTC e da DCCTEC, pode-se concluir que as simulações utilizando o modelo *Levy-walk* obtiveram medidas sobre o encontro dos nós mais parecidas com as obtidas pela mobilidade real capturada. Já os modelos de mobilidade Browniano, MMIG e RWP, para o cenário analisado, podem gerar resultados referentes ao encontro dos nós não condizentes com os dados de movimento real. Entretanto, esta análise sobre o encontro dos nós não é totalmente representativa e sim uma análise aproximada, visto que a captura do movimento foi realizada de maneira individual e depois, os dados de cada movimento foram colocados na mesma área geográfica, para serem analisados juntos e ao mesmo tempo de modo que fossem extraídas as medidas sobre o encontro dos nós de maneira agregada. Assim, quando dados de movimento de vários nós forem coletados, ao mesmo tempo, não sabemos se os resultados serão parecidos com os apresentados nesta seção. Esta investigação poderá ser um desdobramento futuro desta tese.

Na seção a seguir, alguns protocolos de roteamento serão analisados e comparados, tanto usando os modelos de mobilidade quanto a mobilidade real.

6.4 Uma Avaliação dos Protocolos de Roteamento das DTNs sob a Influência da Mobilidade

A maneira como os pacotes trafegam por uma rede determina, dentre outras características, a qualidade dessa rede. Informações como o número de mensagens perdidas e recebidas, tempo de transmissão de um pacote, entre outras, são diretamente relacionadas com o tráfego de pacotes na rede.

Os protocolos de roteamento são utilizados para rotear este tráfego de pacotes. Portanto, a análise do desempenho desses protocolos variando a mobilidade dos nós é um resultado importante no estudo de redes em geral e, particularmente em DTNs, onde o roteamento ainda é um desafio. Os protocolos de roteamento avaliados nesta seção foram o Epidêmico [111], o PROPHET [108] e o SW [113], que são os protocolos mais utilizados na literatura de DTNs e que foram escolhidos por possuírem características diferentes. O protocolo Epidêmico inunda toda a rede com mensagens, já o PROPHET é probabilístico e o SW é um protocolo que limita o número de cópias das mensagens distribuindo-as sem o uso de métricas probabilísticas.

Na avaliação desses protocolos, utilizamos as seguintes métricas. **Taxa de entrega**, que é definida como sendo a razão entre as mensagens que foram roteadas até o nó destino e o total de mensagens criadas na rede. **Atraso médio** é a soma dos atrasos de todas as mensagens trafegadas na rede sobre a quantidade dessas mensagens, onde atraso é definido como sendo a diferença entre o momento que a mensagem foi entregue no destino e o momento de criação da mesma. Por fim, a **sobrecarga** das mensagens na rede é dado pela quantidade de repasses de mensagens que não são para os nós finais dividido pelo número de mensagens entregues. Esta métrica apresenta a quantidade adicional de tráfego gerado na rede que foi necessário para a entrega das mensagens aos seus destinos.

Nas próximas seções, as simulações e os resultados obtidos para essas métricas serão apresentados.

6.4.1 Características da Simulação

Assim como na avaliação do encontro dos nós, também foi utilizado o simulador ONE para avaliar o desempenho dos protocolos de roteamento. Porém para as métricas de roteamento cabe ressaltar que a camada física do simulador ONE não considera interferência no meio físico, a distância entre dois nós no momento da transmissão e nem a existência de possíveis obstáculos. A subcamada MAC é similar ao funcionamento do CSMA/CD, onde cada nó verifica se o meio está ocupado antes de repassar uma mensagem. Além disso, ele verifica se o nó de destino está realizando outra transmissão antes de repassar uma mensagem.

A mobilidade e os protocolos de roteamento foram avaliados em simulações com duração de 600 segundos (após a retirada de 1000 segundos referentes a fase transiente), numa área de $600 \times 800\ m^2$, possuindo 100 nós espalhados aleatoriamente no início da simulação no caso dos modelos de mobilidade. O tamanho do raio de transmissão foi variado de 10 à 100 metros [2], sendo que em cada cenário, todos os nós possuíram o mesmo tamanho para o raio de transmissão. Quanto ao tráfego, foi utilizada uma taxa de transmissão de 2 Mbps, na qual foi gerada uma mensagem por segundo na rede. Os nós origem e destino referentes a esta mensagem foram escolhidos aleatoriamente, sendo que o nó origem é sempre diferente do nó destino. O tamanho das mensagens geradas variou de 1KB à 20KB, escolhido aleatoriamente, e o tamanho do *buffer* de cada nó foi configurado em 5MB.

Além dos parâmetros genéricos, os protocolos de roteamento tiveram alguns parâmetros específicos ajustados. No protocolo PROPHET, o tempo de atualização da constante de envelhecimento k foi igual a 30 segundos e a probabilidade *a priori* de um nó entregar uma mensagem para o destino é de 0,75. Estes valores foram definidos de maneira a obter menos mensagens repassadas na rede. Já para o SW, a otimização binária foi utilizada, pois é um protocolo SW ótimo e o número de cópias de cada mensagem foi definido em 6 em conformidade com o trabalho descrito em [113]. Por fim, foram realizadas 10 rodadas de simulação para cada cenário utili-

[2] Estes valores foram escolhidos para representar dispositivos com baixa potência de transmissão, por exemplo, nós sensores e dispositivos com uma certa potência de transmissão, como notebooks.

zando os modelos de mobilidade para cada protocolo de roteamento analisado e os resultados foram obtidos com um nível de confiança de 95%.

6.4.2 O Impacto na Taxa de Entrega

A avaliação da taxa de entrega se deve ao fato de que a essência de um protocolo de roteamento em uma DTN é levar as mensagens da origem ao destino. Portanto, esta métrica identifica a quantidade normalizada de mensagens entregues, ou seja, a chance de uma mensagem chegar ao seu nó destino através de um protocolo de roteamento.

Assim, na Figura 6.6 é apresentada essa taxa para cada protocolo de roteamento avaliado sob a influência da mobilidade real, variando-se o raio de transmissão. Pode-se observar que o protocolo Epidêmico obteve o melhor desempenho. Esse fato está associado a característica deste protocolo de repassar uma mensagem a todos os nós que ele encontrar e também porque houve pouca ocorrência de enchimento total de *buffer* na rede, evitando o descarte de mensagens. Já para cenários de alta carga, como visto em [51], o protocolo SW apresentou uma taxa de entrega maior que a do protocolo Epidêmico, visto que o Epidêmico apresentou uma alta taxa de perda de mensagens devido ao enchimento total do *buffer* dos nós.

A Figura 6.7 apresenta uma análise da taxa de entrega no protocolo Epidêmico sob a influência dos modelos de mobilidade e da mobilidade real. Nesta figura pode-se observar resultados bastante diferentes quando se compara os resultados para cada modelo de mobilidade em relação aos resultados sob a mobilidade real, para raios de transmissão de até 40 metros. À medida que este raio aumenta, os resultados tendem a se aproximarem, com exceção do modelo *Smooth* em que isso aconteceu muito lentamente. Além disso, para qualquer tamanho de raio a taxa de entrega para os modelos de mobilidade foi menor que a probabilidade para os dados reais, com exceção do modelo Browniano com raio a partir de 60 metros e para o RWP, na qual os resultados foram sempre acima que a taxa de entrega sobe o movimento real. Isso mostra que os modelos aleatórios, principalmente o RWP, geraram uma taxa de

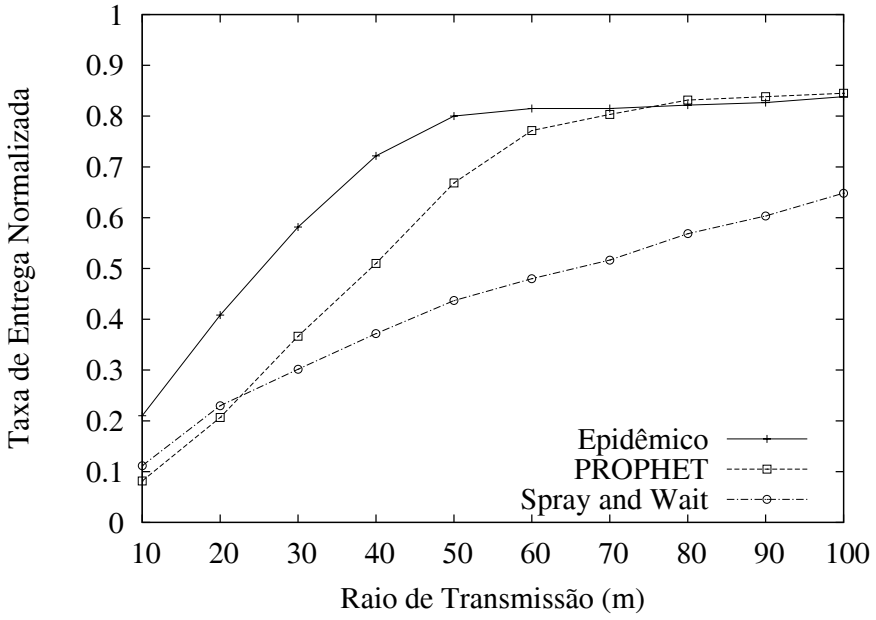


Figura 6.6: Taxa de entrega de mensagens no cenário de mobilidade real variando o protocolo de roteamento.

entrega igual e, até mesmo, superior à da mobilidade real. Isso pode ser explicado pelo fato desses modelos serem aleatórios, eles alcançam toda a área de simulação proporcionando uma alta conectividade na rede e, assim, facilitando a entrega das mensagens.

As Figuras 6.8 e 6.9 mostram a mesma análise, mas para os protocolos PROPHET e SW, respectivamente. Para estes protocolos os valores da taxa de entrega apresentaram a mesma variação entre os modelos de mobilidade, inclusive com uma intensidade até maior que no protocolo Epidêmico. A tendência de aproximação dos valores da taxa de entrega dos modelos de mobilidade ocorreu somente para raio de 100 metros analisado para o protocolo PROPHET, e não aconteceu para o protocolo SW.

Podemos dizer que para todos os protocolos analisados, os modelos aleatórios, principalmente o RWP, apresentaram valores para a probabilidades de entrega próximos aos dos dados reais e, na maioria dos casos, maior que a obtida usando os dados reais. Isso indica que o uso desses modelos levam a resultados aproxima-

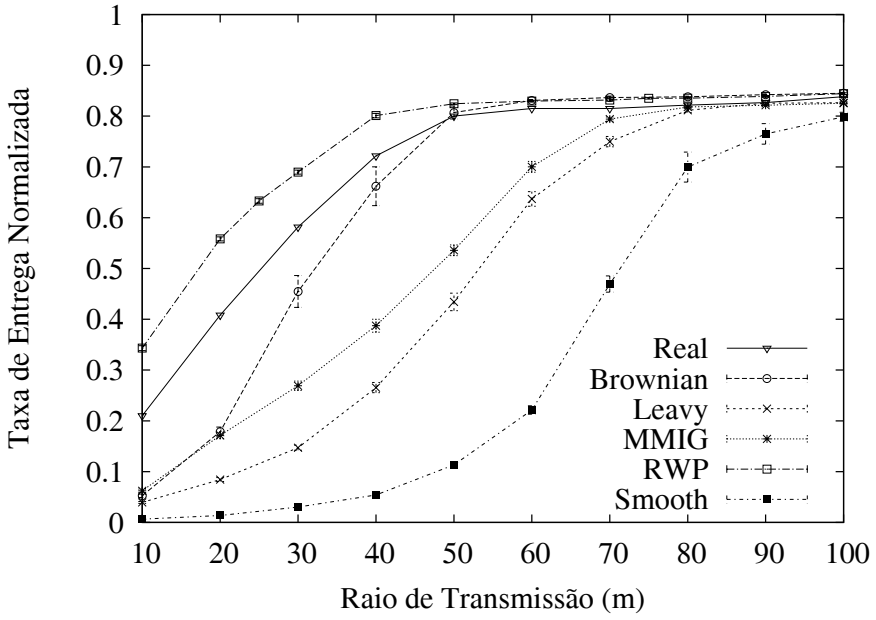


Figura 6.7: Taxa de entrega através do protocolo Epidêmico variando a mobilidade.

dos, mas super-estimados para a taxa de entrega em relação aos dos dados reais, especificamente no cenário analisado.

6.4.3 Resultados Obtidos do Atraso Médio das Mensagens Entregues

Analisar um protocolo de roteamento sob o aspecto do percentual de mensagens entregues é muito importante, mas, se este roteamento da origem ao destino tiver um tempo muito grande, a mensagem pode se tornar obsoleta. Portanto, a métrica do atraso médio total ilustra esse tempo de trânsito de uma mensagem pela rede.

O resultado das simulações para essa metrica, utilizando apenas a mobilidade real, é apresentado na Figura 6.10. Assim como na seção anterior, pode-se observar que o protocolo Epidêmico teve um desempenho superior aos outros protocolos, entretanto, somente a partir do raio igual a 30 metros. Como dito anteriormente, a sua superioridade se deve a inundação de mensagens repassadas pela rede, então, os pacotes entregues podem chegar mais rápido ao destino do que nos outros protocolos, que possuem poucas mensagens na rede. Para raios menores que 30 metros,

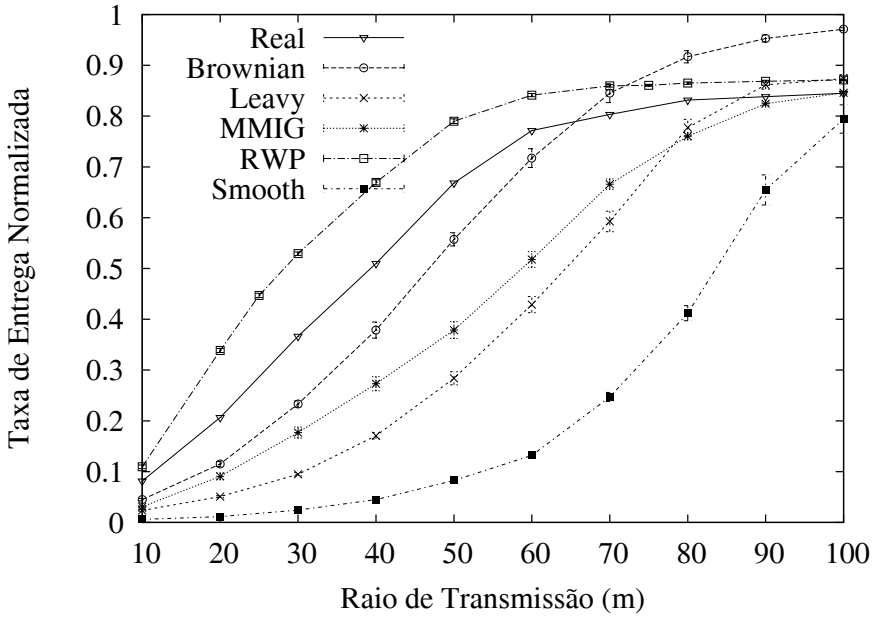


Figura 6.8: Taxa de entrega através do protocolo PROPHET variando a mobilidade.

isso não aconteceu pela ineficiência da inundação de mensagens por causa da baixa conectividade da rede. Outra característica observada é o decremento no valor do atraso médio total à medida que o raio de transmissão aumenta e isso aconteceu para todos os protocolos de roteamento.

A Figura 6.11 apresenta uma análise do atraso médio no protocolo Epidêmico sob mobilidade real $\times$ sintética. Pode-se observar que os resultados de atraso gerados pelo modelo RWP aproximaram dos resultados gerados pela mobilidade real, inclusive acompanhando a mesma tendência de decaimento à medida que o raio aumenta. Para os outros modelos de mobilidade, os resultados foram bastante diferentes, tendendo a se aproximarem apenas quando o raio foi de 100 metros.

Para analisar o atraso médio utilizando os protocolos PROPHET e *Spray and Wait* são apresentadas as Figuras 6.12 e 6.13, respectivamente. Nas duas figuras, os resultados do atraso sob a mobilidade sintética, com exceção do modelo RWP, foram muito diferentes do atraso gerado a partir da mobilidade real. Além disso, houve uma tendência de decaimento no valor médio à medida que aumentava-se o raio, mas, esses valores não se aproximaram para grandes raios. Mostrando assim,

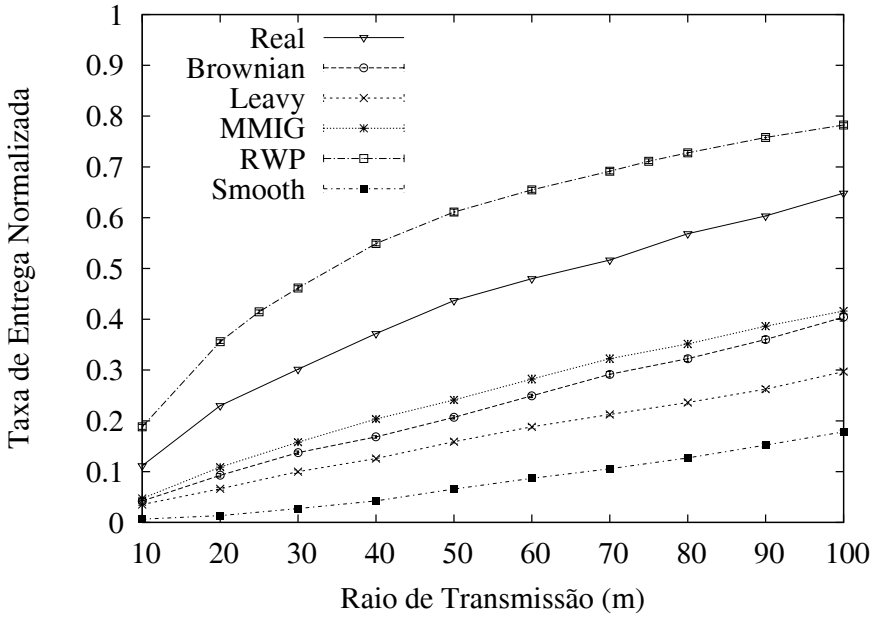


Figura 6.9: Taxa de entrega através do protocolo *Spray and Wait* variando a mobilidade.

uma aproximação apenas dos valores de atraso gerados sob a influência do modelo de mobilidade RWP.

6.4.4 Resultados da Sobrecarga de Mensagens Repassadas pelos Protocolos de Roteamento em Relação as Mensagens Entregues

O repasse de muitas cópias das mensagens numa DTN pode não ser uma característica interessante, pois o consumo de energia para se enviar uma mensagem tende a ser muito maior que o de processá-la. Além disso, o *buffer* dos nós são limitados, portanto, a sobrecarga mostra a quantidade de tráfego gerado a mais na rede para que seja possível a entrega das mensagens aos seus respectivos destinos.

Assim, na Figura 6.14 é mostrada essa sobrecarga de mensagens para cada protocolo de roteamento avaliado sob a mobilidade real. Pode-se verificar que o protocolo SW apresentou o melhor resultado (menor sobrecarga), o que era de se esperar, já

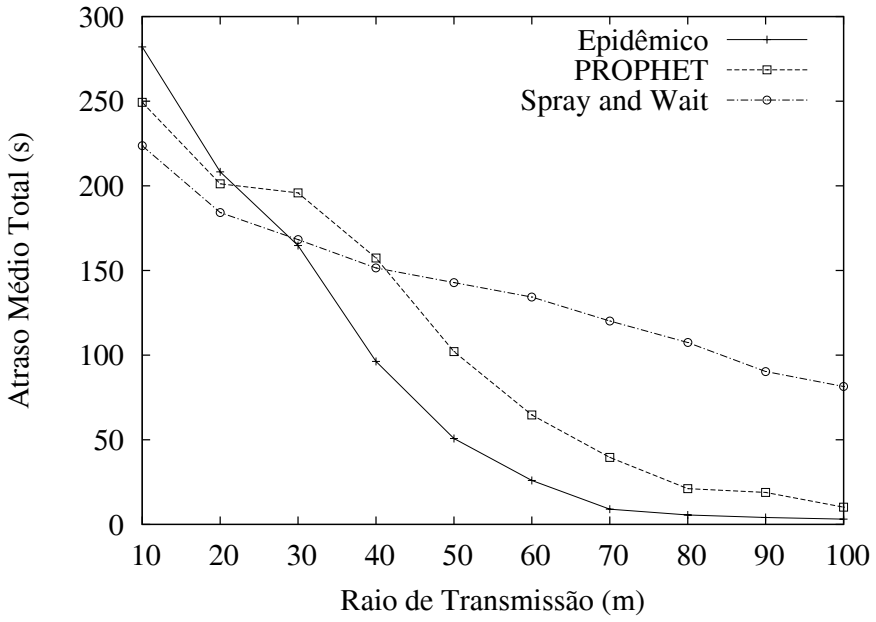


Figura 6.10: Atraso médio das mensagens no cenário de mobilidade real para os três protocolos de roteamento.

que o mesmo só repassa suas mensagens no máximo L vezes (que nesse caso foi igual a 6), porém o número de mensagens entregues é baixo em relação aos outros dois protocolos. Também, como era de se esperar, o protocolo Epidêmico apresentou a maior sobrecarga, pois gera muitas cópias das mensagens a serem entregues.

A métrica sobrecarga é importante nas DTNs pois, as mesmas são suscetíveis a quantidade de tráfego na rede. Assim, nas próximas figuras, será analisado se a sobrecarga gerada através dos modelos de mobilidade é parecida com a gerada pela mobilidade real para cada protocolo.

A Figura 6.15 mostra a sobrecarga das mensagens no protocolo Epidêmico sob a influência tanto da mobilidade real quanto dos modelos. Dentre esses modelos, o Browniano e RWP foram os que mais se aproximaram dos resultados de sobrecarga para a mobilidade real, sendo que até o raio de 40 metros, quase todos os modelos apresentarem uma sobrecarga parecida para o protocolo Epidêmico em relação aos dados reais.

Para a Figura 6.16, é apresentada a sobrecarga das mensagens pelo protocolo

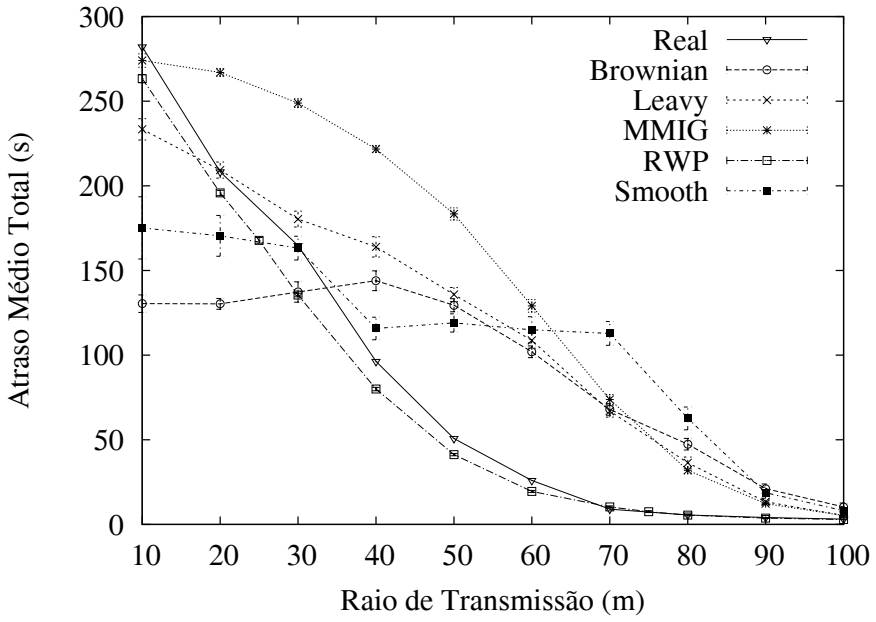


Figura 6.11: Atraso médio das mensagens sob o protocolo Epidêmico variando-se o tipo de mobilidade.

PROPHET sob a influência dos modelos de mobilidade em relação à mobilidade real. Nesta figura, pode-se observar que para tamanho de raio de transmissão de até 50 metros, os resultados sob o efeito dos modelos MMIG e RWP foram próximos da sobrecarga referente à mobilidade real. A partir deste raio, somente a sobrecarga provocada pelo modelo de mobilidade RWP continou acompanhando o crescimento da sobrecarga sob a mobilidade real. Já os outros modelos de mobilidade apresentaram uma diferença de, no mínimo, 100 % nos seus valores de sobrecarga com relação à sobrecarga dos dados reais.

Uma análise da sobrecarga das mensagens gerada pelo protocolo *Spray and Wait* é mostrada na Figura 6.17. Para este protocolo, somente o modelo RWP apresentou uma sobrecarga de mensagens próxima à gerada pela mobilidade real, principalmente, nos raios de transmissão superiores à 50 metros.

Através das figuras mostradas anteriormente, a sobrecarga gerada pelos modelos de mobilidade foi diferente da gerada pelo movimento real para os protocolos analisados, com exceção do modelo RWP.

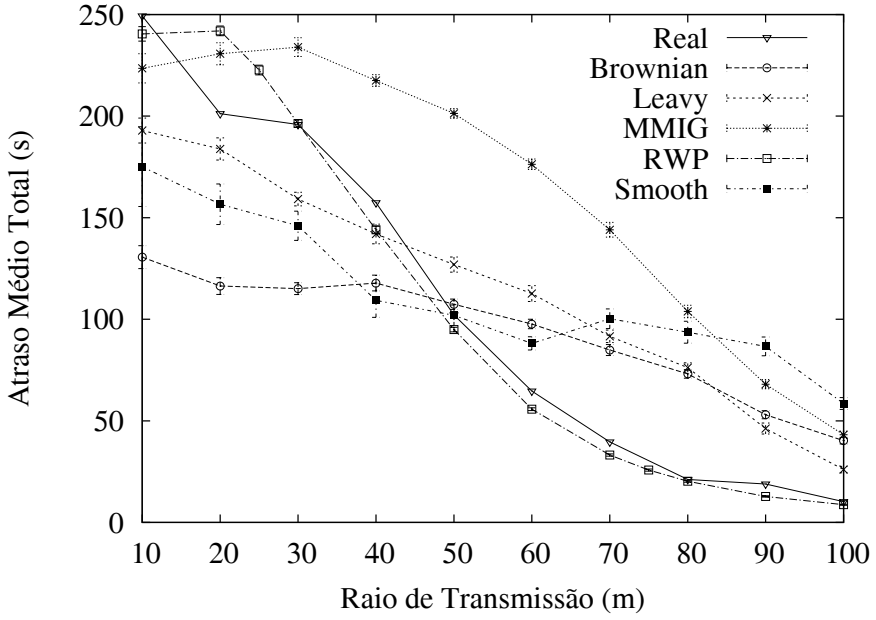


Figura 6.12: Atraso médio das mensagens sob o protocolo PROPHET variando-se o tipo de mobilidade.

6.5 Conclusões

Avaliar o impacto da mobilidade dos nós no desempenho das DTNs é cada vez mais necessário, visto que a mobilidade é uma das causas das desconexões nessas redes. Assim, o objetivo deste capítulo foi avaliar as DTNs sob a influência da mobilidade humana capturada em um cenário real e comparar essa avaliação com resultados obtidos usando alguns modelos de mobilidade ajustados. Para isso, foi investigado o comportamento da DCCTC e da DCCTEC do encontro dos nós para cada tipo de mobilidade (real e sintética). Foi observada uma diferença no comportamento da distribuição dessas medidas usando a mobilidade humana em comparação com a mobilidade sintética e que dentre os modelos de mobilidade, o que apresentou valores mais próximos para a DCCTC e DCCTEC da mobilidade real foi o modelo *Levy-walk*.

Além disso, avaliamos o desempenho dos protocolos de roteamento Epidêmico, PROPHET e *SW* sob diferentes métricas. Os resultados usando a mobilidade real mostraram que o protocolo Epidêmico se comportou melhor nas métricas taxa de en-

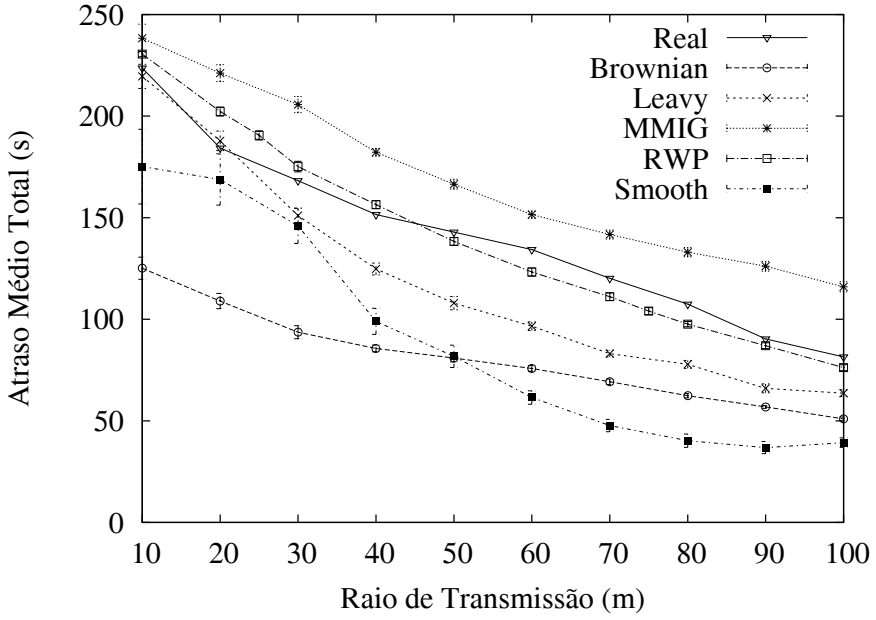


Figura 6.13: Atraso médio das mensagens sob o protocolo *Spray and Wait* variando-se o tipo de mobilidade.

trega e atraso médio total das mensagens. O protocolo *Spray and Wait* foi o melhor na métrica sobrecarga, como esperava-se. Também foi verificado que o desempenho dos protocolos avaliados, usando os modelos de mobilidade, foi bastante diferente dos resultados obtidos com a mobilidade real, com exceção do modelo RWP que se aproximou mais dos resultados referentes aos dados reais que os outros modelos. Isso pode ser explicado pelo fato desse modelo ter gerado movimento para todas as direções da área de simulação proporcionando uma alta conectividade na topologia da rede e, portanto, facilitando a entrega das mensagens. Entretanto, se a topologia da rede não estiver altamente conectada, o uso do modelo RWP pode gerar um resultado diferente sobre o desempenho da rede, em comparação aos resultados obtidos pela mobilidade real.

Diante de tudo isso, podemos dizer que o uso desses modelos, na simulação dos cenários investigados, pode levar a resultados não confiáveis evidenciando a importância do desenvolvimento de modelos de mobilidade mais realistas, para a avaliação de desempenho das DTNs, ou da incorporação dos modelos de mobilidade existentes aos cenários reais, que possuem obstáculos e regras de movimentação.

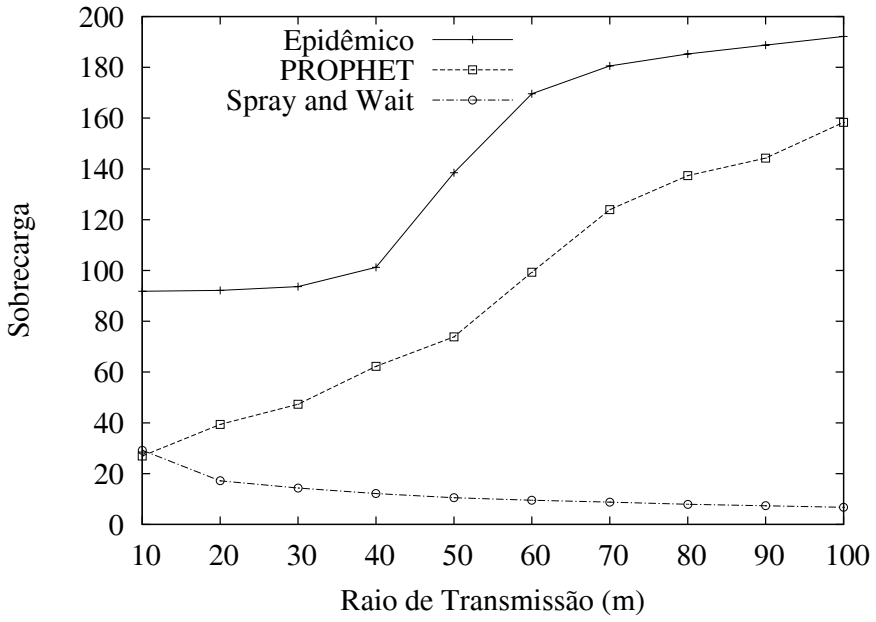


Figura 6.14: Sobrecarga das mensagens no cenário de mobilidade real para os três protocolos de roteamento.

Essa integração dos modelos com as características do cenário real será discutida no próximo capítulo.

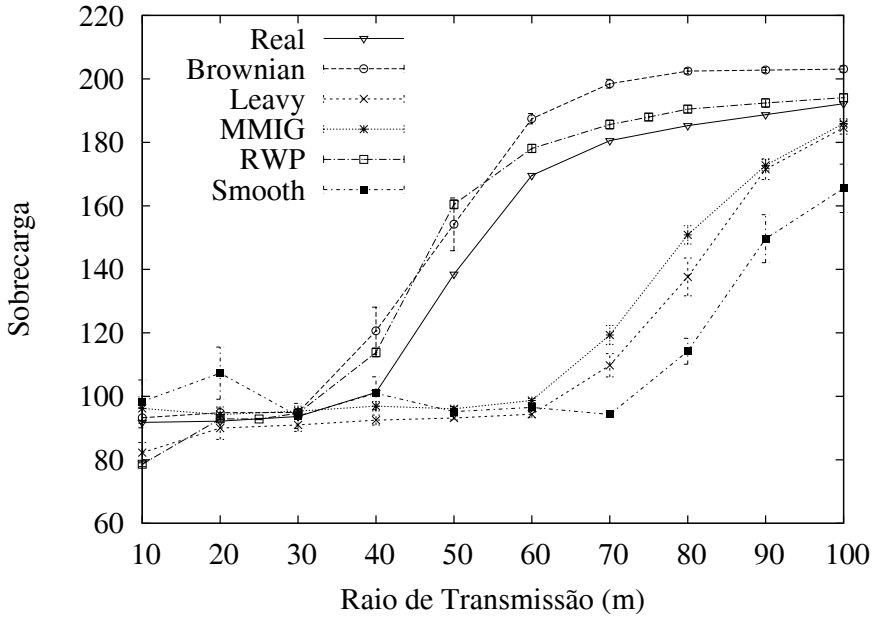


Figura 6.15: Sobrecarga das mensagens sob o protocolo Epidêmico.

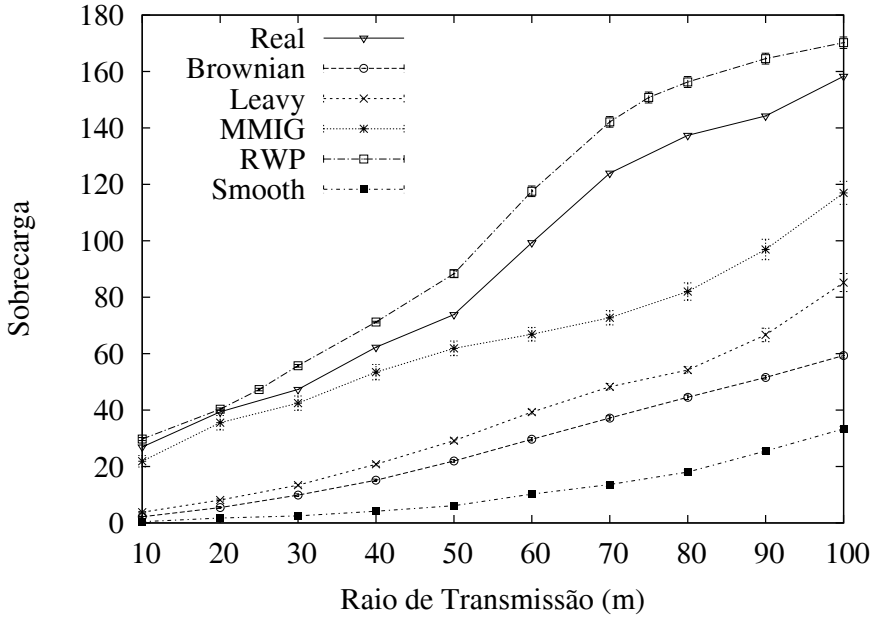


Figura 6.16: Sobrecarga das mensagens sob o protocolo PROPHET.

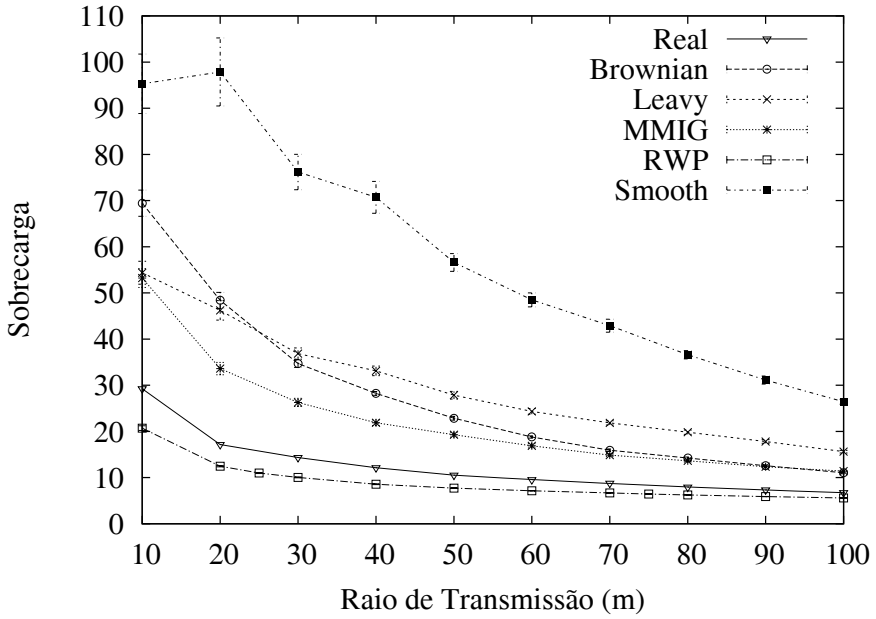


Figura 6.17: Sobrecarga das mensagens sob o protocolo *Spray and Wait*.

Capítulo 7

Conclusões e Trabalhos Futuros

AO longo desta tese foi realizada uma investigação sobre as características da mobilidade de usuários sem fio envolvendo modelagem analítica, simulações e medições reais. Assim, este capítulo finaliza esta investigação apresentando nas seções, a seguir, as considerações finais, as dificuldades encontradas ao longo do caminho e as perspectivas para trabalhos futuros.

7.1 Considerações Finais

A mobilidade é um dos componentes mais importantes na avaliação de desempenho das MANETs e DTNs e, por isso, deve ser considerada no projeto dos protocolos desenvolvidos para essas redes. Assim, representar a mobilidade dos usuários através de modelos de mobilidade tem sido um dos esforços de parte da comunidade científica nos últimos anos. Entretanto, algumas características indesejáveis foram descobertas nesses modelos. Dentro desse contexto, o objetivo desta tese foi investigar as características da mobilidade humana capturada em cenários reais e da mobilidade sintética gerada pelos modelos de mobilidade.

Para isso foi apresentada, no Capítulo 3, uma proposta de caracterização da mobilidade com base em uma análise espaço-temporal dos componentes do movimento e através de uma metodologia proposta para o tratamento dos dados a serem

caracterizados. Através desta metodologia, várias medidas de interesse sobre os componentes (velocidade, aceleração e ângulo de mudança de direção) e do tempo de pausa no movimento puderam ser extraídas, permitindo assim a obtenção de informações detalhadas sobre os componentes desse movimento e o fornecimento de dados importantes para o desenvolvimento de modelos de mobilidade mais realistas. Assim, podemos dizer que esta proposta de caracterização é uma importante ferramenta para a extração de informações detalhadas sobre a movimentação de usuários móveis, tanto através de registros obtidos em experimentos reais, quanto para o movimento extraído dos modelos de mobilidade.

Ainda relacionado a este objetivo, no Capítulo 4 foram obtidos dados de movimentação real capturados em uma área de lazer, que foram tratados e analisados posteriormente. Assim, nesse capítulo foram descritos: a coleta do movimento humano no parque Quinta da Boa Vista, o tratamento aplicado aos dados para a extração dos componentes do movimento e a elaboração de uma análise dos resultados obtidos através de um estudo estatístico. O movimento humano investigado apresentou variações pequenas na velocidade e no ângulo de mudança de direção, indicando que existe uma dependência temporal no mesmo. Isto foi verificado pela ocorrência de uma alta correlação na velocidade e uma correlação média no ângulo de mudança de direção. Além disso, observamos que as pessoas movimentaram-se pelos mesmos lugares, em dias e horários diferentes, levando a identificação de uma dependência espacial no movimento investigado.

Outro objetivo desta tese foi verificar a proximidade dos modelos de mobilidade aos dados de movimentação real capturados, ou seja, um esforço de validação desses modelos. Assim, no Capítulo 5, foi proposta uma técnica de ajuste desses modelos, através do método MSE, com base nos dados do movimento humano capturado. Além disso, foi realizada uma comparação entres esses modelos em relação aos dados reais. Os resultados obtidos indicaram um melhor ajuste dos modelos de mobilidade *Levy-walk* e MMIG, dentre os modelos avaliados. Além disso, pela identificação de dependências temporais e espaciais no movimento humano analisado (como visto no Capítulo 4), o mesmo não possui um comportamento aleatório como é o caso dos modelos Browniano e RWP. Entretanto, esses resultados são específicos para

o cenário investigado. Conclusões mais gerais referentes a qual modelo se ajusta melhor à mobilidade humana devem ser feitas somente quando um conjunto maior de cenários puderem ser avaliados. Em relação a técnica de ajuste, dentro do limite do nosso conhecimento, esta é primeira proposta que tem a intenção de ajustar um modelo de mobilidade para a realização de simulações de movimento mais próximas de um movimento real.

Após a apresentação de uma nova proposta para a caracterização da mobilidade e de uma técnica de ajuste de modelos de mobilidade, foi realizada uma avaliação de desempenho, no Capítulo 6, de um tipo específico de redes móveis, que são as DTNs. Nesta avaliação foram utilizados os registros de movimentação humana capturada e os modelos de mobilidade ajustados, com o objetivo de verificar se o impacto dos diferentes tipos de mobilidade é parecido ou não, ou seja, será que se utilizássemos um determinado modelo de mobilidade na simulação de uma DTN, os resultados obtidos seriam os mesmos se utilizássemos registros de movimentação real? Para isso, utilizamos o simulador ONE para a realização das simulações avaliadas. Nesta avaliação foi investigada a influência da mobilidade no comportamento do encontro dos nós, através da análise da distribuição cumulativa empírica do tempo de contato e do tempo entre contato dos nós em uma DTN. Também verificamos que essas medidas apresentaram valores diferentes quando comparados os resultados através da mobilidade humana com os resultados extraídos dos modelos de mobilidade e, ainda, dentre esses modelos, o *Levy-walk* foi o que teve o tempo de contato e tempo entre contatos mais parecidos aos dos dados reais. Além dessa avaliação, foi realizada uma investigação do desempenho de alguns protocolos de roteamento (Epidêmico, PROPHET e *Spray and Wait*) para as DTNs sob o impacto dessa mobilidade (real $\times$ sintética). Os resultados obtidos também mostraram uma diferença entre o desempenho dos protocolos sob as mobilidades real e sintética, evidenciando assim, que cuidados devem ser tomados quando usa-se um determinado modelo para representar a mobilidade e não leva este fator em consideração nas conclusões apresentadas.

Acreditamos que os resultados obtidos nesta tese puderam esclarecer vários pontos que estavam em aberto, referentes ao desafio de se caracterizar a mobilidade de usuários móveis, do ajuste de modelos de mobilidade à um movimento real e sobre

o impacto desses movimentos no desempenho das DTNs. A partir destes resultados modelos de mobilidade mais adequados, que os utilizados atualmente, possam ser desenvolvidos.

7.2 Dificuldades Encontradas ao Longo desta Pesquisa

A seguir, algumas dificuldades que foram identificadas e enfrentadas durante o desenvolvimento desta tese serão descritas.

7.2.1 A obtenção de movimento humano em cenários reais

Com relação ao objetivo principal da tese, que foi analisar a mobilidade através de dados reais, o primeiro desafio encontrado foi como coletar o movimento real de usuários de uma rede sem fio. Foram feitos alguns estudos referentes à extração de movimento através de *traces* da conectividade de redes locais sem fio (WLANs). Entretanto, os dados de conectividade a pontos de acesso disponíveis apresentaram informações pouco detalhadas sobre o movimento dos usuários nessas redes. A partir disso, foram pesquisadas algumas maneiras de se coletar diretamente o movimento real.

O uso de GPS, sensores sem fio contendo acelerômetro, cartões RFID (*Radio-Frequency IDentification*) [130], dentre outros sistemas de localização, foram investigados e decidimos pelo sistema de GPS por sua abrangência em termos de uso e pela boa qualidade dos dados coletados. Entretanto, esta decisão nos limitou à coleta de movimento somente em ambientes abertos e, ainda, tivemos problemas com alguns tipos de GPS, que possuíam baixa precisão (erro de localização maior que 10 metros) e instabilidade no funcionamento em alguns cenários reais. A solução foi utilizar um receptor de GPS contendo uma alta precisão na coleta da posição geográfica. Para isso, foi escolhida a linha de GPS portátil do fabricante *Trimble*.

Além disso, o esforço de coletar movimento humano em um cenário real depende das condições físicas do cenário investigado (existência de obstáculos naturais à recepção do sinal do sistema de satélite), das condições climáticas (ocorrência de nuvens que atrapalham também a recepção do sinal) e da qualidade da constelação dos satélites (existência de um número mínimo de satélites para obter a localização da posição geográfica com a precisão desejada) que atendam ao cenário no período investigado. Por estas restrições, muitos cenários reais não foram utilizados e muitos dos registros coletados, no cenário investigado, apresentaram erros que levaram ao descarte de alguns dos dados obtidos.

Depois de quatro meses investidos na coleta de movimento, aproximadamente 120 experimentos (registros de movimentação) foram coletados, dos quais 100 registros foram analisados nesta tese, como descrito na Seção 4.1.1, totalizando assim 39.617 amostras analisadas. O esforço de coletar dados reais sobre o movimento dos usuários tem sido intensamente discutido e incentivado pela comunidade científica da área, como pode ser visto no projeto CRAWDAD [45]. Outra discussão é em relação ao nível de detalhamento do movimento capturado, ou seja, a granularidade dos dados obtidos. Assim, os registros do movimento capturado serão disponibilizados na base de dados do projeto CRAWDAD para a comunidade científica, sendo assim, mais uma contribuição desta tese.

7.2.2 O ajuste dos modelos de mobilidade a dados de movimentação real

Durante o desenvolvimento da tese, percebemos que a tarefa de ajustar um determinado modelo de mobilidade em relação a um cenário real é totalmente dependente do nível de conhecimento do pesquisador em relação a este modelo. Visto que a escolha dos limites dos valores a serem testados nos parâmetros de um modelo pode se tornar uma tarefa extremamente específica e difícil de ser realizada, para que este ajuste seja adequado. Além disso, quanto maior for o número de parâmetros de um modelo, mais complexo será testar as combinações necessárias para se obter o ajuste esperado.

Através da investigação realizada nesta tese verificamos que os modelos considerados realistas, dentre todos os modelos de mobilidade analisados, foram os mais difíceis de serem ajustados, visto que possuem muitos parâmetros de configuração, e ainda, quando esses parâmetros forem pouco intuitivos, como foi observado no modelo *Levy-walk*.

7.2.3 Como escolher um modelo de mobilidade

A partir dos resultados obtidos nesta tese, escolher o "melhor" modelo de mobilidade para a avaliação de uma rede móvel (por exemplo: MANET ou DTN) vai depender das necessidades que o pesquisador tem quanto ao realismo das simulações a serem realizadas. Assim, identificamos duas maneiras de representar essas necessidades:

(i) representação da movimentação dos usuários de maneira mais geral e abrangente: esta abordagem pode gerar movimentos com poucas características realistas, sob o ponto de visto da micro-mobilidade, e apresentar pouca ou nenhuma relação com os obstáculos e regras de movimentação de um cenário real. Os modelos de mobilidade a serem utilizados nesta abordagem devem apresentar as seguintes características: depedência espacial e temporal nos componentes do movimento gerado, e serem simples de se configurar e usar. Esta abordagem não leva em consideração o mapa geográfico e a existência de obstáculos no cenário onde a rede móvel está inserida. Isso pode influenciar de maneira inadequada a topologia de conectividade da rede móvel avaliada. Como exemplos de modelos para essa abordagem, podemos recomendar o modelo MMIG e o modelo *Levy-walk*, sendo que o segundo é mais difícil de ser configurado, devido a grande quantidade de parâmetros de configuração.

(ii) representação mais realista e em função do cenário físico a ser avaliado: esta abordagem busca integrar um modelo de mobilidade ao cenário físico em que a rede móvel será avaliada. Assim, esta abordagem exige um esforço maior do pesquisador na configuração minunciosa do cenário utilizado para que o

movimento seja gerado de maneira mais realista, levando em conta a existência de obstáculos e regras de movimentação do mapa geográfico do cenário em questão. Esta abordagem leva a resultados de movimento mais próximos de uma situação real, mas esses resultados poderão ser específicos para esse cenário. Além disso, é mais difícil usar esta abordagem devido a grande quantidade de parâmetros que devem ser levados em consideração. Esta abordagem não foi investigada na presente tese de doutorado, mas é um importante tópico de pesquisa.

7.3 Perspectivas para Trabalhos Futuros

A partir do que foi investigado nesta tese, o estudo sobre mobilidade pode proporcionar diversos desdobramentos como trabalhos futuros. Assim, apresentamos, a seguir, algumas dessas possibilidades de trabalhos futuros.

- Avaliar alguns modelos de mobilidade baseados em obstáculos e em mapas geográficos com regras de movimentação, visto que o cenário real investigado também possui obstáculos.
- Aplicar os componentes do mapa conceitual [20] no modelo MMIG.
- Desenvolver uma ferramenta que automatize o processo de escolha dos intervalos de cada parâmetro de um modelo de mobilidade para que o procedimento de ajuste seja mais eficiente e rápido.
- Capturar e analisar a movimentação de pessoas em outros cenários reais, como por exemplo o movimento de pessoas em grupo ou com interesses específicos se movimentando por uma determinada região em intervalos de tempo maiores que os apresentados na presente tese. Feito isso, investigar o encontro dos nós e comparar as características da distribuição do tempo entre contatos desses cenários com as distribuições obtidas no Capítulo 6.
- Capturar e analisar a movimentação de veículos pelas vias de trânsito de uma cidade em intervalos de tempo maiores que os apresentados na presente tese e,

aplicar essa movimentação capturada na avaliação de redes veiculares, como por exemplo, das VANETs.

- Aplicar a proposta de caracterização nos registros de movimentação humana obtidos nos trabalhos [95, 96] e analisar os resultados obtidos. Além disso, aplicar a técnica de ajuste em alguns modelos de mobilidade com relação a essa movimentação e analisar os resultados obtidos.

- Investigar outras maneiras de se capturar a movimentação de possíveis usuários de uma rede sem fio, como por exemplo dentro de prédios ou outros ambientes fechados.

- Investigar o impacto da mobilidade em outros itens das DTNs, como capacidade da rede, no consumo de energia e no dimensionamento da memória (*buffer*) dos dispositivos da rede, além de avaliar outros mecanismos de roteamento e encaminhamento de dados para essas redes.

- Avaliar outros tipos de redes móveis, como por exemplo MANETs e redes sem fio heterogêneas [131, 132], sob o impacto da mobilidade real capturada e sob os modelos de mobilidade ajustados ao cenário real.

Bibliografia

[1] "IEEE 802.15 WPAN Task Group 1 (TG1)," URL http://www.ieee802.org/15/pub/TG1.html. Último acesso em 15/08/2009.

[2] "IEEE P802.11: The Working Group for Wireless LANs," URL http://www.ieee802.org/11/index.shtml. Último acesso em 15/08/2009.

[3] "The IEEE 802.16 Working Group on Broadband Wireless Access Standards," URL http://ieee802.org/16/. Último acesso em 15/08/2009.

[4] "IEEE 802.20Mobile Broadband Wireless Access (MBWA)," URL http://grouper.ieee.org/groups/802/20/. Último acesso em 15/08/2009.

[5] J. Schiller, *Mobile Communications*. Boston, MA, USA: Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., 2000.

[6] M. Weiser, "The computer for the twenty-first century," *Scientific American*, vol. 265, no. 3, pp. 94–104, 1991.

[7] S. Corson and J. Marker, "Mobile Ad hoc Networking (MANET)," *RFC 2501*, jan 1999.

[8] C.-K. Toh, *Ad Hoc Mobile Wireless Networks Protocols and Systems*. Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall PTR, 2002.

[9] M. Ilyas, *The Handbook of Ad Hoc Wireless Networks*. Boca Raton, FL: CRC Press LLC, 2003.

[10] S. Yousefi, M. S. Mousavi, and M. Fathy, "Vehicular ad hoc networks (vanets): Challenges and perspectives," *ITS Telecommunications Proceedings, 2006 6th International Conference on*, pp. 761–766, June 2006.

[11] V. Naumov, R. Baumann, and T. Gross, "An evaluation of inter-vehicle ad hoc networks based on realistic vehicular traces," in *Proceedings of the seventh ACM international symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing (MOBIHOC)*, Florence, Italy, 2006, pp. 108–119.

[12] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci, "Wireless sensor networks: a survey," *Computer Networks*, vol. 38, no. 4, pp. 393–422, 2002.

[13] E. F. Nakamura, "Fusão de dados em redes de sensores sem fio," Ph.D. dissertation, Departamento de Ciência da Computação, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Brasil, 2007.

[14] A. Boukerche, H. Oliveira, E. Nakamura, and A. Loureiro, "Localization systems for wireless sensor networks," *IEEE Wireless Communications*, vol. 14, no. 6, pp. 6–12, December 2007.

[15] H. A. B. F. Oliveira, A. Boukerche, E. F. Nakamura, and A. A. F. Loureiro, "Localization in time and space for wireless sensor networks: An efficient and lightweight algorithm," *Performance Evaluation*, vol. 66, no. 3-5, pp. 209–222, 2009.

[16] I. F. Akyildiz, X. Wang, and W. Wang, "Wireless mesh networks: a survey." *Computer Networks*, vol. 47, no. 4, pp. 445–487, 2005.

[17] S. Burleigh, A. Hooke, L. Torgerson, K. Fall, V. Cerf, B. Durst, K. Scott, and H. Weiss, "Delay-tolerant networking: an approach to interplanetary internet," *IEEE Communications Magazine*, vol. 41, no. 6, pp. 128–136, 2003.

[18] K. Fall, "A delay-tolerant network architecture for challenged internets," in *SIGCOMM '03: Proceedings of the 2003 conference on Applications, techno-*

logies, architectures, and protocols for computer communications, Karlsruhe, Germany, 2003, pp. 27–34.

[19] T. Camp, J. Boleng, and V. Davies, "A Survey of Mobility Models for Ad Hoc Network Research," *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 2, no. 5, pp. 483–502, 2002.

[20] C. Bettstetter, "Mobility Modeling in Wireless Networks: Categorization, Smooth Movement, and Border Effects," *SIGMOBILE Mobile Computer Communications Review*, vol. 5, no. 3, pp. 55–66, 2001.

[21] P. Johansson, T. Larsson, N. Hedman, B. Mielczarek, and M. Degermark, "Scenario-Based Performance Analysis of Routing Protocols for Mobile Ad-Hoc Networks," in *Proceedings of the 5th ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking, MobiCom'99*, Seattle, Washington, USA, 1999, pp. 195–206.

[22] C. A. V. Campos, "Uma Modelagem da Mobilidade Individual para as Redes Móveis Ad Hoc," Master's thesis, Programa de Engenharia de Sistemas e Computação, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2003.

[23] F. Bai, N. Sadagopan, and A. Helmy, "The IMPORTANT framework for analyzing the Impact of Mobility on Performance Of RouTing protocols for Ad hoc NeTworks," *Elsevier Ad Hoc Networks*, vol. 1, pp. 383–403, 2003.

[24] R. Jain, *The Art of Computer Systems Performance Analysis.* New York, NY, USA: John Wiley and Sons, 1991.

[25] J.-Y. L. Boudec, "Performance evaluation of computer and communication systems," EPFL, 2007.

[26] S. Maag, A. C. Viana, and F. Zaïdi, "One step forward: Linking wireless self-organising networks validation techniques with formal testing approaches," *ACM Computing Surveys*, vol. 41, pp. 1–39, 2009.

[27] S. Kurkowski, T. Camp, and W. Navidi, "Two Standards for Rigorous MANET Routing Protocol Evaluation," in *IEEE MASS'06*, Vancouver, Canada, oct 2006, pp. 256–266.

[28] T. R. Andel and A. Yasinac, "On the credibility of manet simulations," *IEEE Computer*, vol. 39, no. 7, pp. 48–54, 2006.

[29] J. Liu, Y. Yuan, D. M. Nicol, R. S. Gray, C. C. Newport, D. Kotz, and L. F. Perrone, "Empirical validation of wireless models in simulations of ad hoc routing protocols," *Simulation*, vol. 81, no. 4, pp. 307–323, 2005.

[30] W. Kiess and M. Mauve, "A survey on real-world implementations of mobile ad-hoc networks," *Ad Hoc Networks*, vol. 5, no. 3, pp. 324–339, 2007.

[31] C. Tuduce and T. Gross, "A Mobility Model Based on WLAN Traces and Its Validation," in *Proc. of the IEEE INFOCOM'05*, Miami, USA, 2005, pp. 664–674.

[32] M. Kim, D. Kotz, and S. Kim, "Extracting a Mobility Model from Real User Traces," in *Proc. of the IEEE INFOCOM'06*, Barcelona, Spain, April 2006, pp. 1–13.

[33] W. Zhao, M. Ammar, and E. Zegura, "A message ferrying approach for data delivery in sparse mobile ad hoc networks," in *MobiHoc '04: Proceedings of the 5th ACM international symposium on Mobile ad hoc networking and computing*, Roppongi Hills, Tokyo, Japan, 2004, pp. 187–198.

[34] P. Hui, A. Chaintreau, J. Scott, R. Gass, J. Crowcroft, and C. Diot, "Pocket switched networks and human mobility in conference environments," in *WDTN '05: Proceeding of the 2005 ACM SIGCOMM workshop on Delay-tolerant networking*, Philadelphia, Pennsylvania, USA, 2005, pp. 244–251.

[35] "HAGGLE - A European Union funded project in Situated and Autonomic Communications," URL http://www.haggleproject.org/, último acesso em 18/08/2009.

[36] A. Chaintreau, P. Hui, J. Crowcroft, C. Diot, R. Gass, and J. Scott, "Impact of human mobility on opportunistic forwarding algorithms," *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 6, no. 6, pp. 606–620, 2007.

[37] M. L. J. Yoon and B. Noble, "Random Waypoint Considered Harmful," in *Proc. of the IEEE INFOCOM'03*, San Francisco, USA, apr 2003, pp. 1312–1321.

[38] S. Kurkowski, T. Camp, and M. Colagrosso, "MANET Simulation Studies: the Incredibles," *SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review*, vol. 9, no. 4, pp. 50–61, 2005.

[39] J.-Y. Le Boudec and M. Vojnovic, "Perfect Simulation and Stationarity of a Class of Mobility Models," in *Proc. of the INFOCOM'05*, Miami, USA, 2005, pp. 72–79.

[40] J. Yoon, M. Liu, and B. Noble, "A General Framework to Construct Stationary Mobility Models for the Simulation of Mobile Netwoks," *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 5, no. 7, pp. 860–871, jul 2006.

[41] H. Pucha, S. M. Das, and Y. C. Hu, "The performance impact of traffic patterns on routing protocols in mobile ad hoc networks," in *MSWiM '04: Proceedings of the 7th ACM international symposium on Modeling, analysis and simulation of wireless and mobile systems*. New York, NY, USA: ACM, 2004, pp. 211–219.

[42] J. Leguay, T. Friedman, and V. Conan, "Evaluating mobility pattern space routing for dtns," in *INFOCOM 2006. 25th IEEE International Conference on Computer Communications. Proceedings*, April 2006, pp. 1–10.

[43] M. Grossglauser and D. N. C. Tse, "Mobility increases the capacity of ad hoc wireless networks," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 10, no. 4, pp. 477–486, 2002.

[44] D. Kotz and T. Henderson, "CRAWDAD: A Community Resource for Archiving Wireless Data at Dartmouth," *IEEE Pervasive Computing*, vol. 4, no. 4, pp. 12–14, Oct. 2005.

[45] "CRAWDAD - Community Resource for Archiving Wireless Data At Dartmouth," URL http://crawdad.cs.dartmouth.edu/, último acesso em 18/08/2009.

[46] C. A. V. Campos and L. F. M. de Moraes, "A Markovian Model Representation of Individual Mobility Scenarios in Ad Hoc Networks and Its Evaluation," *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, vol. 2007, 2007, 14 pages.

[47] C. A. V. Campos and L. F. M. de Moraes, "Investigating the User Mobility in Wireless Mobile Networks through Real Measurements," in *CoNext Student Workshop 2006 - 2nd ACM Conference on Future Networking Technologies (CoNext)*, Lisbon, Portugal, dec 2006.

[48] C. A. V. Campos and L. F. M. de Moraes, "Uma proposta de caracterização da mobilidade de usuários sem fio através de medição real," in *Anais do XXV Simpósio Brasileiro de Telecomunicações (SBrT2007)*, Recife, Brasil, 2007.

[49] C. A. V. Campos, R. L. Bezerra, T. S. Azevedo, and L. F. M. de Moraes, "An analysis of human mobility using real traces," in *Proc. of the IEEE Wireless Communications and Networking Conference - WCNC 2009*, Budapest, Hungary, apr 2009.

[50] C. A. V. Campos, R. L. Bezerra, and L. F. M. de Moraes, "Uma proposta de técnica para o ajuste de modelos de mobilidade em redes ad hoc e questionamentos sobre a adequação dos parâmetros envolvidos com base em dados reais," in *Anais do XXVII Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos (SBRC 2009)*, Recife, PE, Brasil, 2009.

[51] C. A. V. Campos, R. M. S. Fernandes, and L. F. M. de Moraes, "Uma avaliação das redes tolerantes a atrasos e desconexões através de traces reais

de mobilidade humana," in *Anais do XXVII Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos (SBRC 2009)*, Recife, PE, Brasil, 2009.

[52] C. A. V. Campos, A. M. da Silva, D. C. Otero, L. R. de Albuquerque, and L. F. M. de Moraes, "Mobilidade em Redes Sem Fio Ad hoc," in *Minicurso do V Workshop de Comunicação Sem Fio e Computação Móvel (WCSF2003)*, São Lourenço, MG, Brasil, oct 2003, pp. 1–40.

[53] M. M. Zonoozi and P. Dassanayake, "User Mobility Modeling and Characterization of Mobility Patterns," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 15, no. 7, sep 1997.

[54] X. H. G. Pei, M. Gerla and C. Chiang, "A Wireless Hierarchical Routing Protocol with Group Mobility," in *Proc. of the IEEE WCNC´99*, sep 1999.

[55] G. P. X. Hong, M. Gerla and C. Chiang, "A Group Mobility Model for Ad hoc Wireless Networks," in *Proc. of the ACM MSWiM'99*, aug 1999.

[56] K. H. Wang and B. Li, "Group Mobility and Partition Prediction in Wireless Ad-hoc Networks," in *Proceedings of the IEEE International Conference on Communications 2002*, New York City, NY, USA, apr 2002.

[57] F. Legendre, V. Borrel, M. Dias De Amorim, and S. Fdida, "Reconsidering Microscopic Mobility Modeling for Self-organizing Networks," *IEEE Network Magazine*, vol. 20, no. 6, pp. 4–12, 2006.

[58] M. Musolesi and C. Mascolo, "Mobility Models for Systems Evaluation. A Survey," in *Middleware for Network Eccentric and Mobile Applications*, B. Garbinato, H. Miranda, and L. Rodrigues, Eds. Springer, February 2009, pp. 43–62.

[59] G. Pei, "Scalable Routing Strategies for Large Ad hoc Wireless Networks," Ph.D. dissertation, Department of Computer Science, University of California, Los Angeles, USA, 2000.

[60] V. R. S. S. Basagni, I. Chlamtac and B. A. Woodward, "A distance Routing Effect Algorithm for Mobility (DREAM)," in *ACM/IEEE International*

Conference on Mobile Computing and Networking (MOBICOM 98), 1998, pp. 76–84.

[61] Y. B. Ko and N. H. Vaidya, "Location-Aided Routing (LAR) in Mobile Ad hoc Networks," in *ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking (MOBICOM 98)*, 1998, pp. 66–78.

[62] D. B. Johnson and D. A. Maltz, "Dynamic Source Routing in Ad hoc Wireless Networks," *Mobile Computing*, 1996.

[63] F. Bai and A. Helmy, *A Survey of Mobility Modeling and Analysis in Wireless Adhoc Networks*. Book Chapter in the book *Wireless Ad Hoc and Sensor Networks*, Springer, 2006.

[64] H. H. C. Bettstetter and X. Péres-Costa, "Stochastic Properties of the Random Waypoint Mobility Model: Epoch Length, Direction Distribution, and Cell Change Rate," in *Proc. of the 5th ACM MSWiM*, Atlanta, GA, sep 2002.

[65] G. Resta and P. Santi, "An Analysis of the Node Spatial Distribution of the Random Waypoint Mobility Model for Ad hoc Networks," in *Proceedings of the second ACM international workshop on Principles of mobile computing*, Toulouse, France, 2002, pp. 44–50.

[66] W. Navidi, T. Camp, and N. Bauer, "Improving the Accuracy of Random Waypoint Simulations Through Steady-State Initialization, Technical Report MCS-03-08," The Colorado School of Mines, Tech. Rep., June 2003.

[67] C. A. V. Campos and L. F. M. de Moraes, "Modelos Markovianos de Mobilidade Individual para Redes Móveis Ad hoc," in *Anais do XXI Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores (SBRC2003)*, Natal, RN, Brasil, mai 2003, pp. 135–150.

[68] C. A. V. Campos, D. C. Otero, and L. F. M. de Moraes, "Realistic Individual Mobility Markovian Models for Mobile Ad Hoc Networks," in *Proc. of the IEEE Wireless Communications and Networking Conference - WCNC 2004*, Atlanta, GA, USA, mar 2004, pp. 1980–1985.

[69] C. A. V. Campos and L. F. M. de Moraes, "Caracterizando a Mobilidade de Usuários e Avaliando seu Impacto no Roteamento das Redes Móveis Ad Hoc," in *VI Workshop de Comunicação Sem Fio e Computação Móvel (WCSF)*, Fortaleza, CE, Brasil, oct 2004, pp. 127–136.

[70] B. Liang and Z. J. Haas, "Predictive distance-based mobility management for PCS networks," in *Proceedings of the 25th INFOCOM*, New York, NY, USA, mar 1999, pp. 1377–1384.

[71] A. Jardosh, E. M. Belding-Royer, K. C. Almeroth, and S. Suri, "Towards Realistic Mobility Models for Mobile Ad hoc Networks," in *Proc. of the ACM MobiCom'03*, San Diego, USA, 2003, pp. 217–229.

[72] V. Lenders, J. Wagner, and M. May, "Analyzing the Impact of Mobility in Ad Hoc Networks," in *Proc. of the ACM REALMAN'06*, Florence, Italy, 2006, pp. 39–46.

[73] F. Ekman, A. Keränen, J. Karvo, and J. Ott, "Working day movement model," in *MobilityModels '08: Proceeding of the 1st ACM SIGMOBILE workshop on Mobility models*, Hong Kong, Hong Kong, China, 2008, pp. 33–40.

[74] A. Chaintreau, P. Hui, J. Crowcroft, C. Diot, R. Gass, and J. Scott, "Impact of Human Mobility on the Design of Opportunistic Forwarding Algorithms," in *Proc. of the IEEE INFOCOM'06*, Barcelona, Spain, April 2006, pp. 606–620.

[75] D. Lelescu, U. C. Kozat, R. Jain, and M. Balakrishnan, "Model T++:: an empirical joint space-time registration model," in *ACM MobiHoc*, Florence, Italy, 2006, pp. 61–72.

[76] M. Musolesi and C. Mascolo, "Designing Mobility Models Based on Social Network Theory," *SIGMOBILE Mobile Computing Communications Review*, vol. 11, no. 3, pp. 59–70, 2007.

[77] V. Borrel, F. Legendre, M. D. De Amorim, and S. Fdida, "Simps: using sociology for personal mobility," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 17, no. 3, pp. 831–842, 2009.

[78] A. Mei and J. Stefa, "Swim: A simple model to generate small mobile worlds," in *Proceedings of the INFOCOM´09*, Rio de Janeiro, Brazil, April 2008.

[79] I. Rhee, M. Shin, S. Hong, K. Lee, and S. Chong, "On the Levy-walk Nature Human Mobility," in *IEEE Infocom'08*, Phoenix, USA, 2008, pp. 1597–1605.

[80] K. Lee, S. Hong, S. J. Kim, I. Rhee, and S. Chong, "Slaw: A mobility model for human walks," in *Proceedings of the INFOCOM´09*, Rio de Janeiro, Brazil, April 2009.

[81] A. Petz, J. Enderle, and C. Julien, "A framework for evaluating dtn mobility models," in *Simutools '09: Proceedings of the 2nd International Conference on Simulation Tools and Techniques*, Rome, Italy, 2009, pp. 1–8.

[82] A. M. Silva, B. A. A. Nunes, and L. F. M. de Moraes, "Uma Avaliação dos Efeitos das Regras de Borda e dos Modelos de Mobilidade no Comportamento dos Nós em Redes Ad Hoc," in *VI Workshop de Comunicação Sem Fio e Computação Móvel (WCSF)*, Fortaleza, CE, Brasil, oct 2004, pp. 117–126.

[83] C. Chiang, "Wireless networks multicasting," Ph.D. dissertation, Department of Computer Science, University of California, Los Angeles, USA, 1998.

[84] M. Takai, J. Martin, and R. Bagrodia, "Effects of wireless physical layer modeling in mobile ad hoc networks," in *MobiHoc '01: Proceedings of the 2nd ACM international symposium on Mobile ad hoc networking & computing*, New York, NY, USA, 2001, pp. 87–94.

[85] I. Stepanov and K. Rothermel, "On the impact of a more realistic physical layer on MANET simulations results," *Ad Hoc Networks*, vol. 6, no. 1, pp. 61–78, 2008.

[86] Z. Ji, J. Zhou, M. Takai, and R. Bagrodia, "Improving scalability of wireless network simulation with bounded inaccuracies," *ACM Transaction on Modeling and Computer Simulation*, vol. 16, no. 4, pp. 329–356, 2006.

[87] J. Bicket, D. Aguayo, S. Biswas, and R. Morris, "Architecture and evaluation of an unplanned 802.11b mesh network," in *MobiCom '05: Proceedings of the*

11th annual international conference on Mobile computing and networking, Cologne, Germany, 2005, pp. 31–42.

[88] D. C. Muchaluat-Saade, C. Albuquerque, L. C. S. Magalhães, D. Passos, J. Duarte, and R. Valle, "Redes em malha: Solução de baixo custo para popularização do acesso à internet no brasil," in *Anais do Simpósio Brasileiro de Telecomunicações (SBrT 2007)*, Recife, PE, Brasil, 2007, pp. 1–6.

[89] S. Das, D. Koutsonikolas, and Y. C. Hu, *Measurement-based Characterization of a Wireless Mesh Network, Book Chapter, forthcoming in Handbook of Wireless Mesh and Sensor Networking.* New York, NY, USA: McGraw-Hill International, 2007.

[90] K. Papagiannaki, M. Yarvis, and W. S. Conner, "Experimental Characterization of Home Wireless Networks and Design Implications," in *Proceedings of the 25th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM)*, Barcelona, Spain, apr 2006, pp. 1–13.

[91] X. Zhang, J. Kurose, B. N. Levine, D. Towsley, and H. Zhang, "Study of a Bus-Based Disruption Tolerant Network: Mobility Modeling and Impact on Routing," in *Proc. ACM Intl. Conf. on Mobile Computing and Networking (Mobicom)*, September 2007, pp. 195–206.

[92] N. Banerjee, M. D. Corner, and B. N. Levine, "An Energy-Efficient Architecture for DTN Throwboxes," in *Proceedings of IEEE Infocom*, Anchorage, Alaska, May 2007, pp. 776–784.

[93] D. Ashbrook and T. Starner, "Using gps to learn significant locations and predict movement across multiple users," *Personal Ubiquitous Comput.*, vol. 7, no. 5, pp. 275–286, 2003.

[94] Y. Zheng, Q. Li, Y. Chen, X. Xie, and W.-Y. Ma, "Understanding mobility based on gps data," in *UbiComp '08: Proceedings of the 10th international conference on Ubiquitous computing*, Seoul, Korea, 2008, pp. 312–321.

[95] I. Rhee, M. Shin, S. Hong, K. Lee, and S. Chong, "Human Mobility Patterns and Their Impact on Delay Tolerant Networks," in *Proc. of the ACM HotNets VI*, Atlanta, Georgia, USA, 2007.

[96] C.-H. Lee, S. Kim, and D. Y. Eun, "Super-diffusive behavior of mobile nodes from mobility traces," North Carolina State University, Raleigh, USA, Tech. Rep., jul 2007.

[97] R. L. Bezerra, C. A. V. Campos, and L. F. M. de Moraes, "A mobilidade humana aplicada na análise da conectividade em redes ad hoc," in *Anais do XXVII Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos (SBRC 2009)*, Recife, PE, Brasil, 2009.

[98] R. L. Bezerra, "Análise da conectividade em redes móveis utilizando dados obtidos da mobilidade humana," Master's thesis, Programa de Engenharia de Sistemas e Computação, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2009.

[99] R. M. S. Fernandes, "Proposta de um mecanismo de segurança baseado em troca de chaves assimétricas para redes tolerantes a atrasos e desconexões," Master's thesis, Programa de Engenharia de Sistemas e Computação, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2009.

[100] M. C. Gonzalez, C. A. Hidalgo, and A. L. Barabasi, "Understanding individual human mobility patterns," *Nature*, vol. 453, pp. 779–782, 2008.

[101] W. Navidi and T. Camp, "Stationary Distributions for the Random Waypoint Mobility Model," *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 3, no. 1, pp. 99–108, 2004.

[102] K. Viswanath, K. Obraczka, A. Kottas, and B. Sansó, "Statistical equivalent models for computer simulators with an application to the random waypoint mobility model," *Simulation*, vol. 83, no. 2, pp. 157–172, 2007.

[103] J. Yoon, B. D. Noble, M. Liu, and M. Kim, "Building realistic mobility models from coarse-grained traces," in *ACM MobiSys'06*, Uppsala, Sweden, 2006, pp. 177–190.

[104] M. Boc, A. Fladenmuller, and M. D. de Amorim, "Otiy: Locators Tracking Nodes," in *Proc. of the ACM CoNext'07*, New York, NY, USA, December, 2007.

[105] A. M. Law and W. D. Kelton, *Simulation and Modeling Analysis*. McGraw Hill, 2001.

[106] K. Fall, "A delay-tolerant network architecture for challenged internets," in *ACM Sigcomm'03*, Karlsruhe, Germany, 2003, pp. 27–34.

[107] R. M. Guedes, M. W. R. Silva, and de J. F. Rezende, "Escassez de recursos em redes tolerantes a atrasos e interrupções," in *Anais do XXVI Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos (SBRC 2008)*, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2008, pp. 749–762.

[108] A. Lindgren, A. Doria, and O. Schelén, "Probabilistic routing in intermittently connected networks," *SIGMOBILE Mobile Comput. Comm. Rev.*, vol. 7, no. 3, pp. 19–20, 2003.

[109] E. P. C. Jones, L. Li, and P. A. S. Ward, "Practical routing in delay-tolerant networks," in *WDTN '05: Proceedings of the 2005 ACM SIGCOMM workshop on Delay-tolerant networking*, Philadelphia, Pennsylvania, USA, 2005, pp. 237–243.

[110] J. Burgess, B. Gallagher, D. Jensen, and B. N. Levine, "Maxprop: Routing for vehicle-based disruption-tolerant networking," in *in Proc. IEEE Infocom 2006*, Barcelona, Spain, April 2006.

[111] A. Vahdat and D. Becker, "Epidemic routing for partially connected ad hoc networks," CS-200006. Duke University, Tech. Rep., Apr 2000.

[112] A. Balasubramanian, B. Levine, and A. Venkataramani, "Dtn routing as a resource allocation problem," *SIGCOMM Computing Communications Review*, vol. 37, no. 4, pp. 373–384, 2007.

[113] T. Spyropoulos, K. Psounis, and C. S. Raghavendra, "Spray and wait: an efficient routing scheme for intermittently connected mobile networks," in *WDTN 2005*, Philadelphia, PA, 2005, pp. 252–259.

[114] Z. Zhang, "Routing in intermittently connected mobile ad hoc networks and delay tolerant networks: overview and challenges," *Communications Surveys & Tutorials, IEEE*, vol. 8, no. 1, pp. 24–37, Quarter 2006.

[115] R. C. Shah, S. Roy, S. Jain, and W. Brunette, "Data mules: modeling a three-tier architecture for sparse sensor networks," in *Proceedings of the IEEE International Workshop on First Sensor Network Protocols and Applications, 2003.*, Seattle, WA, USA, 2003, pp. 30–41.

[116] W. Zhao, Y. Chen, M. Ammar, M. D. Corner, B. N. Levine, and E. Zegura, "Capacity Enhancement using Throwboxes in DTNs," in *Proceedings of IEEE International Conf. on Mobile Ad hoc and Sensor Systems (MASS)*, October 2006, pp. 31–40.

[117] C. Boldrini, M. Conti, and A. Passarella, "Impact of social mobility on routing protocols for opportunistic nets," in *IEEE WoWMoM'07*, Helsinki, Finland, 2007, pp. 1–6.

[118] E. M. Daly and M. Haahr, "Social network analysis for routing in disconnected delay-tolerant manets," in *ACM MobiHoc'07*, Montreal, Canada, 2007, pp. 32–40.

[119] J. Karvo and J. Ott, "Time scales and delay-tolerant routing protocols," in *ACM CHANTS'08*, San Francisco, California, USA, 2008, pp. 33–40.

[120] E. C. R. de Oliveira and C. V. N. Albuquerque, "Análise do protocolo NECTAR em cenários com mobilidade e frequentes interrupções," in *Anais do XX-*

VII Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos (SBRC 2009), Recife, PE, Brasil, 2009, pp. 771–784.

[121] L. Song and D. F. Kotz, "Evaluating opportunistic routing protocols with large realistic contact traces," in *ACM CHANTS'07*, Montreal, Quebec, Canada, 2007, pp. 35–42.

[122] J. Leguay, T. Friedman, and V. Conan, "Evaluating mobility pattern space routing for DTNs," in *Proceedings of the 25th IEEE International Conference on Computer Communications (INFOCOM)*, Barcelona, Spain, April 2006.

[123] S. Kim and D. D. Eun, "Impact of super-diffusive behavior on routing performance in delay tolerant networks," in *IEEE ICC'08*, Beijing, China, 2008, pp. 2941–2945.

[124] S. Hong, I. Rhee, S. J. Kim, K. Lee, and S. Chong, "Routing performance analysis of human-driven delay tolerant networks using the truncated levy walk model," in *ACM MobilityModels'08*, Hong Kong, China, 2008, pp. 25–32.

[125] H. Cai and D. Y. Eun, "Toward stochastic anatomy of inter-meeting time distribution under general mobility models," in *ACM MobiHoc'08*, Hong Kong, China, 2008, pp. 273–282.

[126] T. Karagiannis, J.-Y. L. Boudec, and M. Vojnović, "Power law and exponential decay of inter contact times between mobile devices," in *ACM MobiCom'07*, Montréal, Québec, Canada, 2007, pp. 183–194.

[127] A. Keränen, J. Ott, and T. Kärkkäinen, "The one simulator for dtn protocol evaluation," in *Simutools '09: Proceedings of the 2nd International Conference on Simulation Tools and Techniques*, Rome, Italy, 2009, pp. 1–10.

[128] A. Keränen and J. Ott, "ONE - the Opportunistic Network Environment simulator," URL http://www.netlab.tkk.fi/tutkimus/dtn/theone/, último acesso em 15/08/2009.

[129] V. Conan, J. Leguay, and T. Friedman, "Characterizing pairwise inter-contact patterns in delay tolerant networks," in *Autonomics '07: Proceedings of the*

1st international conference on Autonomic computing and communication systems, Rome, Italy, 2007, pp. 1–9.

[130] M. Philipose, K. P. Fishkin, M. Perkowitz, D. J. Patterson, D. Fox, H. Kautz, and D. Hahnel, "Inferring activities from interactions with objects," *IEEE Pervasive Computing*, vol. 3, no. 4, pp. 50–57, 2004.

[131] R. N. B. Rais, T. Turletti, and K. Obraczka, "Coping with episodic connectivity in heterogeneous networks," in *MSWiM '08: Proceedings of the 11th international symposium on Modeling, analysis and simulation of wireless and mobile systems*, Vancouver, British Columbia, Canada, 2008, pp. 211–219.

[132] S. Bromage, C. Engstrom, J. Koshimoto, M. Bromage, S. Dabideen, M. Hu, R. Menchaca-Mendez, D. Nguyen, B. Nunes, V. Petkov, D. Sampath, H. Taylor, M. Veyseh, J. J. Garcia-Luna-Aceves, K. Obraczka, H. Sadjadpour, and B. Smith, "Scorpion: a heterogeneous wireless networking testbed," *SIGMOBILE Mobile Computing Communications Review*, vol. 13, no. 1, pp. 65–68, 2009.