



COPPE/UFRJ

ANÁLISE DA CONECTIVIDADE EM REDES MÓVEIS UTILIZANDO DADOS
OBTIDOS DA MOBILIDADE HUMANA

Rafael Lopes Bezerra

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

Orientador(es): Luís Felipe Magalhães de Moraes

Rio de Janeiro

Março de 2009

ANÁLISE DA CONECTIVIDADE EM REDES MÓVEIS UTILIZANDO DADOS
OBTIDOS DA MOBILIDADE HUMANA

Rafael Lopes Bezerra

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

Aprovada por:

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

Prof. Claudio Luis de Amorim, Ph. D.

Prof. Nilton Alves Junior, Dr.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

MARÇO DE 2009

Bezerra, Rafael Lopes

Análise da Conectividade em Redes Móveis Utilizando Dados Obtidos da Mobilidade Humana/Rafael Lopes Bezerra. - Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2009.

XVI, 86 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Luís Felipe Magalhães de Moraes

Dissertação (mestrado) - UFRJ/COPPE/Programa de Engenharia de Sistemas e Computação, 2009.

Referências Bibliográficas: p. 81-86.

1. Redes Sem Fio Ad Hoc. 2. Mobilidade Humana. 3. Mobilidade Sintética. 4. Análise da Conectividade. 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 esse trabalho às pessoas que sempre estiveram ao meu lado quando precisei, meus pais, meu irmão e minha namorada Renata.

Agradecimentos

Agradeço aos meus pais, Agnaldo e Cristina, ao meu irmão Flávio e à minha avó Eremites por todo carinho e amor, não só durante a realização deste trabalho, como na vida inteira. Sem vocês eu não teria chegado tão longe.

À Renata, que me incentivou e esteve comigo nos piores e melhores momentos. Obrigado por todo carinho e atenção.

Agradeço aos amigos do Laboratório Ravel pela amizade e companheirismo: Rafael Fernandes, Danielle, Tiago, Vina, Jorge, Júlio, Luiz, Rodrigo e Elenílson. Um agradecimento especial ao amigo Beto, pelas discussões, troca de conhecimentos e por toda a ajuda e contribuições na elaboração dessa dissertação.

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

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

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

ANÁLISE DA CONECTIVIDADE EM REDES MÓVEIS UTILIZANDO DADOS
OBTIDOS DA MOBILIDADE HUMANA

Rafael Lopes Bezerra

Março/2009

Orientador: Luís Felipe Magalhães de Moraes

Programa: Engenharia de Sistemas e Computação

O perfil de mobilidade dos usuários é uma das características mais importantes das redes móveis, e influencia o comportamento de diversos componentes, protocolos e aplicações. O desempenho dos protocolos utilizados em redes móveis é afetado pela forma como os nós estão conectados, e por isso o estudo da conectividade é importante. Nesse trabalho é proposta uma metodologia de análise da conectividade, para se ter maior conhecimento do comportamento real de movimentação dos dispositivos móveis, e dessa forma verificar a proximidade dos modelos de mobilidade utilizados em pesquisas com a mobilidade dos dispositivos reais. De forma a ilustrar o uso da metodologia proposta, um cenário de movimentação real foi capturado e diferentes modelos sintéticos da literatura foram utilizados em simulações para obtenção da média ao longo do tempo das seguintes métricas: grau de conectividade dos nós; número de nós isolados; número de subconjuntos de nós conectados; e a duração do intervalo de tempo durante o qual pares de nós permanecem conectados. Esses resultados são comparados com os obtidos através do uso de medidas extraídas de mobilidade real. É feita também uma análise da conectividade para diferentes valores do raio de alcance dos nós.

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

CONNECTIVITY ANALYSIS IN MOBILE NETWORKS USING DATA
OBTAINED FROM HUMAN MOBILITY

Rafael Lopes Bezerra

March/2009

Advisor: Luís Felipe Magalhães de Moraes

Department: Systems Engineering and Computer Science

The users mobile profile is an important feature concerning mobile networks, which influences the behavior of several components, protocols and applications. The performance behavior of protocols used in mobile networks is also affected by the way that the nodes are connected, making the study of connectivity an important issue in this context. This work proposes a methodology for connectivity analysis of mobile networks, which can be utilized to provide a better insight and understanding about real movement behavior of client devices. The technique presented can also be used to compare synthetic mobility models with real traces. In order to illustrate the use of the methodology, a real mobility scenario was captured and different synthetic models from literature were simulated, to obtain the average over time of the following metrics: node degree connectivity; number of isolated nodes; and of subsets of connected nodes; as well as the length of time interval during which pairs of nodes remain connected. These results are compared with those obtained through the use of measures taken from real mobility. The connectivity analysis is also applied to different values for the transmission range.

Conteúdo

Resumo	vi
Abstract	vii
Lista de Figuras	xi
Lista de Tabelas	xiv
Lista de Acrônimos	xv
Notações da análise da conectividade	xvi
1 Introdução	1
1.1 Redes sem fio	2
1.2 Redes Móveis Ad Hoc	4
1.3 Motivação e Especificação do Problema	5
1.4 Objetivo	8
1.5 Contribuições	9
1.6 Organização do Texto	10
2 Trabalhos Relacionados	11

2.1	Modelos de Mobilidade	12
2.1.1	Modelos de Mobilidade Aleatórios	12
	Random Waypoint	12
	Brownian	13
2.1.2	Modelos de Mobilidade Com Dependência Temporal	14
	Smooth Random	14
	MMIG	15
	Levy Walk	15
2.1.3	Modelos de Mobilidade Com Dependência Espacial	16
	Reference Point Group Mobility Model	16
2.1.4	Modelos de Mobilidade Com Restrição Geográfica	16
	Pathway Mobility Model	17
2.2	Análise da Conectividade	17
2.3	Representação de Redes Ad Hoc usando Teoria de Grafos	21
2.4	Considerações Finais	24
3	Uma Proposta de Metodologia Para a Análise da Conectividade em Redes Móveis	26
3.1	Visão Geral	27
3.2	Métricas Para Estudo da Conectividade	27
3.3	Proposta de Metodologia Para a Análise da Conectividade em Redes Móveis	33
3.4	Considerações Finais	36

4	Análise da Conectividade da Mobilidade Humana com Base em Dados Empíricos	39
4.1	Descrição dos Experimentos	40
4.2	Descrição da Obtenção dos Dados Sobre a Conectividade da Rede . .	45
4.3	Resultados	46
5	Análise da Conectividade Através de Modelos Sintéticos de Mobilidade	57
5.1	Descrição da Simulação	58
5.2	Resultados	60
5.3	Variação do raio de alcance	68
6	Conclusão e Trabalhos Futuros	77
6.1	Conclusão	78
6.2	Trabalhos Futuros	80
	Bibliografia	81

Lista de Figuras

1.1	Exemplo de redes sem fio adotando modo infra-estruturado, onde um ponto de acesso é utilizado na comunicação	3
1.2	Exemplo de redes sem fio adotando topologia ad hoc	4
2.1	Exemplo de representação de uma topologia de rede ad hoc	23
3.1	Exemplo da representação de grafos através de matrizes de adjacências	28
3.2	Exemplo do cálculo do coef. de clusterização para o nó i	30
3.3	Exemplo de topologia de uma rede Ad hoc.	32
3.4	Fluxograma das etapas da metodologia proposta	38
4.1	Fotos da Quinta da Boa Vista[1]	40
4.2	Dispositivo GPS utilizado na coleta de dados	41
4.3	Amostras de traces de GPS do Parque da Quinta da Boa Vista[2]	42
4.4	Posicionamento dos nós na área do experimento em diferentes instantes de tempo	44
4.5	Grau médio por nó a cada segundo parametrizado em r (raio de alcance dos nós)	47
4.6	Distribuição cumulativa do grau para raio de 100m	48

4.7	Estatísticas das métricas coeficiente de clusterização, núm. de nós isolados e núm. de componentes conexas para diferentes valores do raio de alcance (r) em metros	49
4.8	Estatísticas das métricas grau e duração dos enlaces para diferentes valores do raio de alcance (r) em metros	50
4.9	Distribuição cumulativa do número de nós isolados para raio de alcance de 100m	51
4.10	Distribuição de probabilidade da duração dos enlaces para raio de alcance de 100m	52
4.11	Coeficiente de clusterização médio a cada segundo parametrizado em r (raio de alcance dos nós)	54
4.12	Distribuição cumulativa do coeficiente de clusterização para o raio de alcance de 100m	55
5.1	Estatísticas de comp. conexos para os diferentes modelos e dados reais para o raio de alcance de 100m	61
5.2	Estatísticas de enlaces para os diferentes modelos e dados reais para o raio de alcance de 100m	62
5.3	Distribuições de probabilidade cumulativa do grau para os dados reais e modelos sintéticos para o raio de alcance de 100m	63
5.4	Distribuições de probabilidade cumulativa do número de nós isolados para os dados reais e modelos sintéticos para o raio de alcance de 100m	64
5.5	Distribuições de probabilidade cumulativa do coeficiente de clusterização para mobilidade real e sintética para o raio de alcance de 100m	65
5.6	Distribuições de probabilidade cumulativa do número de componentes conexas para mobilidade real e sintética para o raio de alcance de 100m	66

5.7	Distribuições de probabilidade cumulativa da duração dos enlaces para mobilidade real e sintética para o raio de alcance de 100m	67
5.8	Grau médio dos nós a cada segundo para os dados reais e o modelo Brownian parametrizado em r (raio de alcance dos nós)	69
5.9	Grau médio dos nós a cada segundo para os modelos Levy e MMIG parametrizado em r (raio de alcance dos nós)	70
5.10	Grau médio dos nós a cada segundo para os modelos Smooth e RWP parametrizado em r (raio de alcance dos nós)	71
5.11	Coefficiente de clusterização médio dos nós a cada segundo para os dados reais e o modelo Brownian parametrizado em r (raio de alcance dos nós)	73
5.12	Coefficiente de clusterização médio dos nós a cada segundo para os modelos Ley e MMIG parametrizado em r (raio de alcance dos nós) .	74
5.13	Coefficiente de clusterização médio dos nós a cada segundo para os modelos Smooth e RWP parametrizado em r (raio de alcance dos nós)	75

Lista de Tabelas

4.1	Valores de MSE obtidos para as métricas de conectividade sobre os dados reais	46
4.2	Estatísticas das medidas sobre os dados reais para o raio de alcance de 100m	56
5.1	Parâmetros dos modelos de mobilidade utilizados na simulação	59
5.2	Valores de MSE obtidos comparando os modelos de mobilidade e os dados reais para cada métrica da conectividade para o raio de alcance de 100m	67

Lista de Acrônimos

CDMA	:	<i>Code Division Multiple Access;</i>
CSCW	:	<i>Computer Supported Cooperative Work;</i>
GPRS	:	<i>General Packet Radio Service;</i>
GPS	:	<i>Global Positioning System;</i>
IEEE	:	<i>Institute of Electrical and Electronic Engineers;</i>
MANET	:	<i>Mobile Ad Hoc Network;</i>
MLE	:	<i>Maximum Likelihood Estimation;</i>
MMIG	:	<i>modelo Markoviano de Mobilidade Individual Genérico;</i>
MSE	:	<i>Mean Square Error;</i>
PAN	:	<i>Wireless Personal Area Network;</i>
PDA	:	<i>Personal Digital Assistant;</i>
RPGM	:	<i>Reference Point Group Mobility Model;</i>
RWP	:	<i>Random Waypoint;</i>
UMTS	:	<i>Universal Mobile Telecommunication System;</i>
VANET	:	<i>Vehicular Ad Hoc Network;</i>
WLAN	:	<i>Wireless Local Area Network;</i>

Notações da análise da conectividade

$G(t)$:	<i>Grafo não direcionado no instante t;</i>
V	:	<i>Conjunto de vértices de um grafo G;</i>
$E(t)$:	<i>Conjunto de enlaces de um grafo G no instante t;</i>
$e_{i,j}(t)$:	<i>Enlace entre os nós i e j no instante t;</i>
$(x_i(t), y_i(t))$:	<i>Posição do nó i no instante t;</i>
R	:	<i>Raio de alcance de um nó;</i>
$D_{i,j}(t)$:	<i>Distância euclidiana entre os nós i e j no instante t;</i>
$G_i(t)$:	<i>Grau do nó i no instante t;</i>
$V(i, t)$:	<i>Número de vizinhos do nó i no instante t;</i>
$E(i, t)$:	<i>Número de enlaces entre os vizinhos de i no instante t;</i>
$C_i(t)$:	<i>Coefficiente de clusterização do nó i no instante t;</i>
$DE(i, j, t_1)$:	<i>Duração do enlace entre i e j que se iniciou no instante t_1;</i>

Capítulo 1

Introdução

ATUALMENTE , presenciamos um acelerado crescimento na área de redes locais sem fio (WLANs - *Wireless Local Area Networks*). Essas redes permitem a mobilidade dos equipamentos, flexibilidade, diminuição de custos de infraestrutura, instalações em áreas de difícil cabeamento, maior confiabilidade e robustez, dentre outros. Todas estas características permitem que a tecnologia móvel sem fio ofereça aos usuários a possibilidade de acesso aos mesmos serviços a qualquer instante e de diferentes lugares. Este capítulo apresenta conceitos básicos sobre redes sem fio móveis, bem como a motivação e os objetivos do presente trabalho. Serão expostos nesse capítulo ainda as contribuições do trabalho e a organização do texto.

1.1 Redes sem fio

Em decorrência do recente amadurecimento e da proliferação das tecnologias para comunicação sem fio e de dispositivos móveis com diferentes capacidades de processamento e comunicação de dados, aumentou também o interesse por protocolos, serviços e aplicações para redes móveis. Essas redes permitem a mobilidade dos equipamentos, flexibilidade, diminuição de custos de infra-estrutura, instalações em áreas de difícil cabeamento, maior confiabilidade e robustez, dentre outros. Todas estas características permitem que a tecnologia móvel sem-fio ofereça aos usuários a possibilidade de acesso aos mesmos serviços a qualquer instante e em diferentes lugares.

Redes móveis são comumente classificadas como infra-estruturadas ou ad hoc. Em uma rede com infra-estrutura, toda a comunicação entre os dispositivos móveis ocorre através de um ponto de acesso (ou estação base) (ver Figura 1.1). Mesmo próximos uns aos outros, os dispositivos móveis não conseguem realizar qualquer tipo de comunicação direta. Enquanto que as redes infra-estruturadas já existem há vários anos na forma de tecnologias de redes celulares com capacidade de transmissão de dados, como por exemplo as tecnologias GPRS, CDMA2000 e UMTS, as redes ad hoc vêm ganhando uma atenção cada vez maior através da popularização de padrões de protocolos como o Wi-fi e o Bluetooth.

Estes padrões possibilitam uma comunicação espontânea entre dispositivos, seja para o compartilhamento de recursos, ou para a interação e colaboração espontânea entre usuários (ver Figura 1.2). Por exemplo, através da tecnologia Bluetooth, dispositivos distintos, tais como um telefone celular, um PDA (*Personal Digital Assistant*), um relógio equipado com um sensor GPS (*Global Positioning System*), e uma câmera digital podem formar uma rede de curto alcance, restrito a uma pequena área (chamada de PAN, *Personal Area Network*) e executar um serviço que necessite dos recursos disponíveis em cada um dos dispositivos, como por exemplo a transferência de uma fotografia através do celular e seu armazenamento no PDA com a indicação da localização exata e que a foto foi feita. Também na disciplina de sistemas de suporte à colaboração (CSCW), cada vez mais estuda-se mecanismos

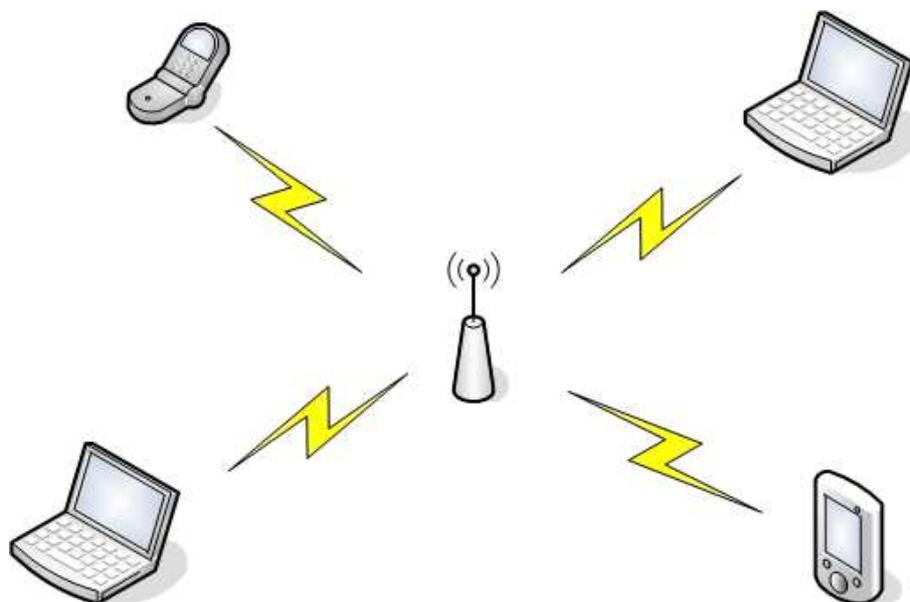


Figura 1.1: Exemplo de redes sem fio adotando modo infra-estruturado, onde um ponto de acesso é utilizado na comunicação

que dêem apoio para uma colaboração espontânea entre usuários (*Spontaneous Collaboration*), tais como a troca de dados, como mapas, textos, dados públicos, entre usuários que se encontram em determinado local.

As redes ad hoc são principalmente indicadas para situações onde não é possível, ou não faz sentido, instalar uma infra-estrutura de rede. Como por exemplo: trabalhos colaborativos fora do escritório; aplicações de gerenciamento de crises (resultado de desastres naturais ou de guerras); operações de emergência de busca e salvamento; PAN; redes de sensores¹; e aplicações militares. Ou seja, as redes ad hoc são úteis onde for necessário montar uma rede de forma rápida para troca de informação, sem a necessidade da presença de estações de base fixas e administradores de redes.

¹Uma coleção de pequenos dispositivos (sensores), de baixo custo, com pouca ou nenhuma mobilidade, que são capazes de monitorar o ambiente onde estão localizados, de se comunicarem entre si e de transmitirem os dados coletados para uma determinada estação base, através da rede ad hoc.

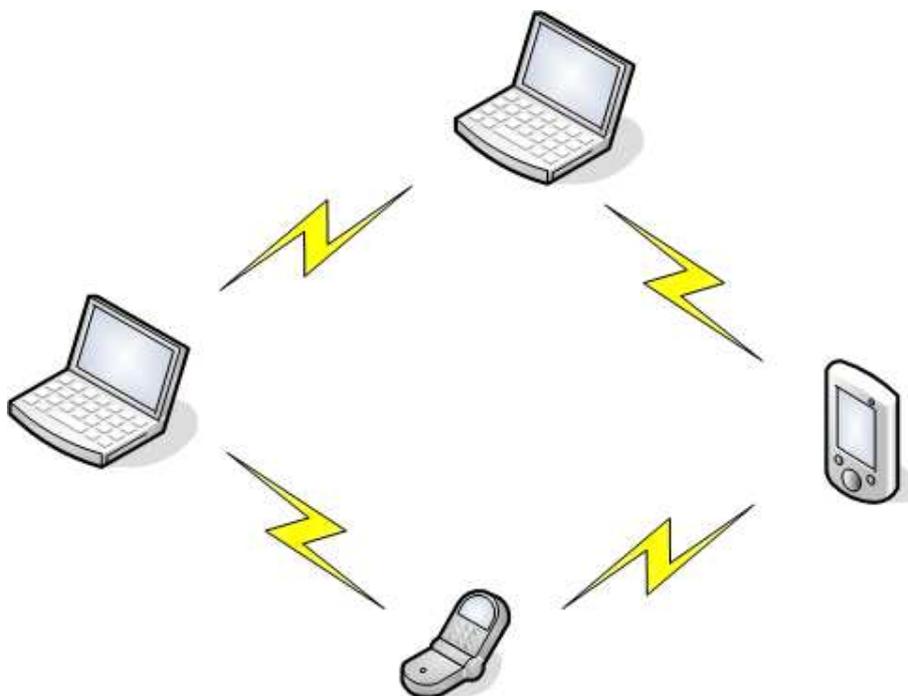


Figura 1.2: Exemplo de redes sem fio adotando topologia ad hoc

1.2 Redes Móveis Ad Hoc

As redes móveis ad hoc (MANET, *Mobile Ad hoc Network*) consistem de nós (dispositivos móveis) com uma interface para comunicação sem fio, que se movem variando dinamicamente o sub-conjunto dos demais nós com os quais um nó pode se comunicar (chamados nós vizinhos). Este sub-conjunto depende de vários fatores tais como a tecnologia de comunicação sem fio utilizada, o protocolo de controle de acesso ao meio, o nível de energia disponível no nó, a potência de transmissão, a concentração de nós mutuamente alcançável e o padrão de movimentação do nó entre outros. Caso dois nós que não são vizinhos queiram se comunicar, outros nós móveis agem como roteadores encaminhando pacotes de dados até o destino. Desta forma, uma rota entre esses dois nós é estabelecida para que a comunicação fim-a-fim se torne possível.

Devido a todos estes fatores, as MANETs tendem a ser muito dinâmicas e instáveis, demandando o projeto de novos protocolos adequados para estes tipos de redes. Estes protocolos podem se prestar a uma série de diferentes tarefas, tais como, encaminhamento de dados, anúncio e descoberta de recursos remotos, difusão

e gerenciamento das informações dinâmicas sobre os recursos e serviços disponíveis na rede, entre outros.

Algumas vantagens desse tipo de redes são: alta tolerância a falhas, rápida instalação e mobilidade. Alta tolerância a falhas, uma vez que não existe um ponto central de falha e a MANET é uma rede auto-organizável, a rápida instalação, pois não é necessária uma infra-estrutura prévia, e mobilidade. Devido à mobilidade, informações sobre roteamento devem ser trocadas para refletir mudanças na conectividade dos enlaces e a topologia pode mudar com frequência.

1.3 Motivação e Especificação do Problema

Técnicas de Avaliação em MANETs

As MANETs inspiram muitos estudos devido à mobilidade dos dispositivos, à disponibilidade de dispositivos portáteis de pequeno tamanho e tecnologia sem fio de baixo custo. Entre os principais desafios de redes móveis Ad Hoc está a frequente mudança de topologia causada pela mobilidade dos usuários. Nos últimos anos foram desenvolvidos muitos protocolos e algoritmos para redes MANETs em cenários específicos. Esses estudos precisam ser avaliados e três formas clássicas são utilizadas pela comunidade científica: técnica analítica, simulação e medição.

Técnica Analítica

A técnica analítica utiliza ferramentas matemáticas para realizar a avaliação do desempenho de um sistema. É a técnica que oferece maior compreensão do sistema, mas em contrapartida é a mais difícil de obter. E muitas vezes, para se obter um modelo analítico, é preciso assumir tantas hipóteses e simplificações que o modelo acaba não representando corretamente a realidade.

Técnica de Simulação

Nas simulações todos os aspectos e algoritmos que devem ser investigados são modelados e examinados em um ambiente artificial com alto grau de abstração. Isso

permite um controle rígido, repetibilidade, larga escala e baixo custo. A simulação se tornou a principal ferramenta utilizada para avaliar o desempenho de protocolos e aplicações em MANETs. Por um lado, ao contrário da experimentação real, a simulação provê um ambiente controlado que pode ser facilmente escalado até milhares ou milhões de nós. Por outro lado, muitas simplificações e aproximações devem ser feitas, o que impede uma fiel representação da realidade. Entre os parâmetros utilizados pela simulação como padrão de tráfego e comunicação, modelo de mobilidade e modelo de propagação, os modelos de mobilidade têm um grande impacto na distribuição dos enlaces e rotas, e por isso também no desempenho das aplicações e protocolos. A maior parte dos estudos relacionados às redes sem fio que consideram mobilidade utilizam modelos de mobilidade para a movimentação dos nós móveis por ser mais simples do que utilizar a técnica analítica.

Estudos recentes demonstraram que os modelos de mobilidade nem sempre representam corretamente a movimentação de nós móveis em cenários reais [3, 4, 5, 6, 7]. Dentre esses problemas, podemos citar: a ocorrência de paradas e mudanças bruscas de movimento, o efeito das regras de borda [8], o decaimento da velocidade média quando analisada a fase transiente da simulação, a distribuição não uniforme dos nós [9, 6, 10] e o comportamento zigue-zague da direção do movimento [11, 12]. Além disso, a mobilidade afeta significativamente a qualidade de serviço. Por exemplo, mudanças freqüentes de topologia causada pela movimentação de um nó em cenários de alta mobilidade podem resultar na quebra de rotas estabelecidas, levando à degradação da qualidade de serviço.

Outros problemas têm sido encontrados em simulações. Alguns trabalhos, como [13, 3, 14, 15], discutem técnicas para evitar ou amenizar alguns desses problemas, como a remoção da fase transiente e a utilização de uma metodologia mais rigorosa para realizar simulações. Entretanto, alguns desses problemas permanecem sem solução.

Técnica de Medição

A técnica de medição é a que apresenta resultados mais próximos à realidade, pois é realizada a partir da observação real de um sistema. Todas as partes de um sistema

estão funcionando em um cenário real, porém nem sempre a captura dos dados pode ser escalável ou viável, pelo alto custo de hardware, software e mão-de-obra. Nos últimos anos têm crescido o número de trabalhos que utilizaram implementações de cenários reais em seus estudos [16]. Alguns estudos foram conduzidos entre estudantes e pesquisadores em Cambridge [17] e entre os participantes da INFOCOM 2005 [18]. Uma grande base de dados está sendo formada atualmente, CRAWDAD [19], onde pesquisadores de todo o mundo têm disponibilizado à comunidade de pesquisa seus traces obtidos de cenários reais. Porém, a maioria dos estudos e implementações reais utiliza dados provenientes de redes sem fio infra-estruturadas. Estudos que obtêm dados de MANETs ainda são poucos atualmente.

Estudo e Análise da Conectividade em MANETs:

Além da questão dos modelos de mobilidade não representarem corretamente o comportamento de movimentação de MANETs reais, o estudo das propriedades topológicas dessas redes permite o desenvolvimento de soluções para problemas inerentes às MANETs, assim como a melhoria de soluções existentes.

A falta de uma entidade central em MANETs transfere os procedimentos de roteamento para os nós móveis. Assim, nós distantes necessitam da colaboração de nós intermediários, que devem retransmitir mensagens para que as mesmas atinjam o seu destino final. O método para selecionar os nós intermediários, assim como a resposta às quebras de enlaces nas rotas são características que diferem os protocolos de roteamento ad hoc existentes [20]. O estudo das propriedades topológicas de redes sem fio com mobilidade é um passo básico para o melhor entendimento do comportamento das mesmas [21, 16], o que permitirá o desenvolvimento de novos protocolos de roteamento ou melhorar o desempenho dos existentes.

Outra área de estudo que se beneficia diretamente do melhor entendimento do comportamento da mobilidade humana do ponto de vista da conectividade é o controle de topologia. A topologia de uma rede depende de fatores incontroláveis como tempo, interferência, ruído, assim como de fatores controláveis como a direção da antena e o raio de alcance do nó. O campo de estudos de controle da topologia tenta através dos fatores controláveis, obter melhor desempenho da rede. Por exemplo,

utilizando informações sobre a topologia da rede, pode ser estudada a escolha de um raio de alcance de forma a maximizar o uso da bateria dos dispositivos e mantendo a rede conectada [22].

1.4 Objetivo

Nos últimos anos, muitos trabalhos têm evidenciado o impacto da mobilidade no desempenho e conectividade das redes ad hoc. No entanto, poucos estudos realizaram uma análise detalhada da conectividade nessas redes ou abordaram a análise da movimentação real de dispositivos móveis.

O objetivo desse trabalho é investigar a conectividade de uma topologia de rede móvel sem fio baseada em traces de movimentação real. Essa investigação permite ter maior conhecimento do comportamento real de movimentação dos dispositivos móveis, e com isso verificar a proximidade dos modelos de mobilidade utilizados em pesquisas com a mobilidade dos dispositivos reais.

Para tal, uma metodologia de análise da conectividade é proposta onde os passos para a análise são definidos, bem como métricas para esse estudo. As métricas permitem realizar uma análise detalhada da conectividade e topologia da rede, e verificar o nível de confiabilidade do uso de mobilidade sintética na representação da movimentação real. Para motivar o uso da metodologia, a mobilidade em um cenário real foi capturada, e foram realizadas simulações utilizando alguns modelos de mobilidade usados pela comunidade científica. Esses modelos tiveram seus parâmetros ajustados de forma a se aproximarem ao máximo da mobilidade real, e o comportamento da mobilidade utilizando esses modelos e os dados reais foi comparado.

1.5 Contribuições

Uma das contribuições deste trabalho é a proposta de uma metodologia para análise da conectividade em um cenário de mobilidade. A metodologia pode ser aplicada em diversos cenários de mobilidade, seja a mobilidade humana (pedestres), ou animal, veicular ou robótica. Utilizando a metodologia podemos comparar a conectividade da rede obtida através da mobilidade real dos dispositivos e a obtida através da mobilidade sintética, e com isso verificar a confiabilidade da representação da mobilidade real pela sintética nesse cenário.

São propostas métricas para capturar características topológicas interessantes sobre a conectividade em determinado cenário de mobilidade tais como grau de um nó, número médio de nós isolados, coeficiente de clusterização, número de componentes conexas e duração dos enlaces. Essas métricas são utilizadas na metodologia proposta para caracterizar a conectividade e compará-la através de dados extraídos da mobilidade real e sintética.

Para realizar a aplicação da metodologia, foram desenvolvidas ferramentas utilizando as linguagens AWK, C e a ferramenta MATLAB, para que o tratamento e a análise estatística dos dados segundo a metodologia proposta seja feita.

Além disso, a mobilidade de dispositivos foi capturada em um cenário real através de um dispositivo de GPS, e esses traces serão disponibilizados para a comunidade científica para estudo através do repositório de dados CRAWDAD[19]. Poucos traces de GPS com a precisão dos obtidos nesse trabalho estão atualmente disponíveis à comunidade acadêmica.

Foram geradas simulações utilizando os modelos Brownian, Levy Walk, MMIG, RWP e Smooth para comparar sua mobilidade com a mobilidade obtida no cenário real.

1.6 Organização do Texto

No Capítulo 2 é feita uma revisão bibliográfica sobre os principais modelos de mobilidade encontrados na literatura onde suas principais vantagens e desvantagens são comentadas e analisadas. Esse capítulo apresenta também os principais trabalhos que realizam uma análise da conectividade em MANETs, e ainda algumas formas mais utilizadas de representação de redes sem fio através da teoria de grafos.

No Capítulo 3 uma metodologia de análise da conectividade é proposta e descrita. E ainda, as métricas para essa análise são definidas. Através dessa análise, a representação da conectividade de uma rede em um cenário real pode ser investigada.

Uma aplicação da metodologia proposta é apresentada no Capítulo 4. Nesse capítulo é descrita a captura de mobilidade humana em um cenário real. Além disso, foram calculadas as medidas de conectividade, definidas no capítulo anterior, para diferentes raios de alcance dos nós nesse cenário real.

Os resultados obtidos para análise da conectividade utilizando mobilidade sintética são confrontados com os obtidos através de dados reais no Capítulo 5. Foram simulados os seguintes modelos de mobilidade, MMIG, Brownian, *Levy walk*, Smooth e Random Waypoint, e uma análise da conectividade sob a mobilidade sintética foi realizada. Para isso, foi feito um ajuste dos parâmetros de cada modelo de mobilidade, de forma que o comportamento dos modelos fosse o mais próximo do comportamento real. Nesse capítulo as estatísticas das métricas calculadas são apresentadas com detalhe.

Finalmente no Capítulo 6, são consolidados os resultados apresentados nos capítulos anteriores através das conclusões e observações relevantes. Por fim, são sugeridas também algumas perspectivas para trabalhos futuros.

Capítulo 2

Trabalhos Relacionados

NA avaliação de desempenho de MANETs, um dos principais aspectos a ser considerado é a mobilidade dos usuários. Em decorrência disso, foram propostos, na literatura, uma grande quantidade de modelos de mobilidade sintética para representar a mobilidade de usuários. Nesse capítulo serão apresentados alguns dos principais modelos de mobilidade da literatura e será feita uma breve descrição desses modelos.

Nesse capítulo veremos ainda uma revisão bibliográfica dos principais estudos que realizam alguma análise da conectividade em MANETs e como é feita a representação de MANETs utilizando a teoria de grafos.

2.1 Modelos de Mobilidade

A movimentação dos nós em uma rede sem fio é fundamental para o estudo e simulação da rede. Os modelos de mobilidade devem reproduzir os movimentos reais de nós móveis, considerando diversos aspectos como mudanças na velocidade e direção, e que essas mudanças ocorrem de tempos em tempos.

E como os modelos de mobilidade influenciam o desempenho dos protocolos, é desejável que os mesmos tenham um padrão de movimentação similar ao padrão observado em aplicações reais, ou as conclusões obtidas em estudos baseados em simulações podem estar erradas. Por isso, para avaliar protocolos de redes ad hoc é necessário escolher o modelo de mobilidade apropriado.

Uma categorização para os modelos de mobilidade baseada nas características específicas de mobilidade foi criada por F. Bai, Sadagopan e Helmy em [12]. Os modelos de mobilidade são classificados segundo: aleatoriedade, dependência temporal, dependência espacial e restrições geográficas. Serão descritos nesse capítulo alguns modelos de mobilidade mais utilizados para simulação.

2.1.1 Modelos de Mobilidade Aleatórios

Em modelos aleatórios, os nós móveis se movem aleatoriamente e livremente sem restrições. Para ser mais específico, o destino, velocidade e direção são escolhidos aleatoriamente e independente dos outros nós. Essa é a classe de modelos mais utilizada atualmente em simulações.

Random Waypoint

O modelo Random Waypoint foi proposto por Johnson e Maltz [23], e atualmente é o modelo de mobilidade mais utilizado para avaliar protocolos de roteamento em MANETs devido a sua simplicidade. A movimentação segundo esse modelo é feita da seguinte maneira: cada nó móvel seleciona aleatoriamente um ponto dentro da área de simulação como seu destino. Então ele viaja até esse ponto com velocidade

constante escolhida aleatoriamente e uniformemente distribuída dentro do intervalo $[0, V_{max}]$, onde V_{max} é a velocidade máxima permitida para um nó móvel. O destino e velocidade de um nó são escolhidos independentemente dos outros nós. Ao chegar no destino, o nó permanece parado por um determinado intervalo definido como “tempo de pausa”. Se esse intervalo for zero, temos uma mobilidade contínua. Após esse tempo, o nó novamente escolhe um destino e velocidade, e o processo se repete até o final do tempo de simulação.

No modelo Random Waypoint, a velocidade máxima e o tempo de pausa são os parâmetros que determinam o comportamento de mobilidade dos nós. Se a velocidade máxima é baixa e o tempo de pausa é longo, a topologia da rede se torna estável. Por outro lado, se a velocidade é alta e o tempo de pausa curto, a topologia esperada é altamente dinâmica. Alterando esses dois parâmetros (especialmente a velocidade máxima), o modelo pode gerar vários cenários de mobilidade diferentes.

Brownian

O modelo de mobilidade Brownian (também chamado de Random Walk) foi originalmente proposto para reproduzir o movimento imprevisível de partículas em física. Esse modelo é uma variante do Random Waypoint, onde os nós móveis alteram a sua direção e velocidade a cada intervalo de tempo mas não existe o tempo de pausa. A cada intervalo de tempo t , o nó móvel aleatoriamente e uniformemente seleciona uma nova direção do intervalo $(0, 2\pi]$. Uma nova velocidade também é escolhida aleatoriamente no intervalo $[0, V_{max}]$.

Os modelos Random Waypoint e Brownian são modelos de mobilidade sem memória, onde a informação sobre o estado anterior não é usada para a decisão sobre o estado futuro. Ou seja, a velocidade atual é independente da velocidade anterior e velocidade futura é independente da velocidade atual. Com isso temos paradas e mudanças de direção bruscas, e aceleração repentina, um comportamento que não retrata a movimentação em muitas aplicações reais, onde a aceleração usualmente cresce e decresce incrementalmente e a mudança de direção é suave.

Um fenômeno chamado de distribuição espacial não uniforme ocorre durante o tempo de simulação com esses dois modelos. A distribuição dos nós passa de uniforme a não uniforme conforme o andamento da simulação, até que atinge um estado estável. Nesse estado, os nós se concentram no centro da área de simulação, e muito poucos nós ficam perto das bordas da área. Esse fenômeno é resultado do comportamento da mobilidade desses modelos, pois os nós tendem a se movimentar em direção ao centro da área ou o movimento requer que eles atravessem pelo centro e se afastem das bordas. Ao mesmo tempo, os nós convergem, dispersam e convergem novamente, resultando em uma flutuação da densidade de nós. Esse segundo fenômeno é chamado de onda de densidade.

2.1.2 Modelos de Mobilidade Com Dependência Temporal

A mobilidade de um nó pode ser limitada pela aceleração, velocidade e mudança de direção. A velocidade atual do nó depende da velocidade anterior, e por isso as velocidades de um único nó estão correlacionadas. Essa característica é chamada de dependência temporal.

A natureza sem memória dos modelos RWP e Brownian os torna inadequados à capturar essa característica temporal. Os modelos apresentados a seguir foram propostos com o objetivo de considerar essa dependência.

Smooth Random

Um modelo de mobilidade que considera a dependência temporal da velocidade é o Smooth Random. Bettstetter [24] observou o comportamento não realístico do modelo Random Waypoint e propôs o Smooth Random com mudança de direção e velocidade incrementais e suaves. Foi observado que nós móveis em cenários reais se movem com velocidades preferenciais, e não velocidades distribuídas uniformemente entre $[0, V_{max}]$. Por isso no modelo Smooth Random a distribuição da velocidade é a seguinte: alguns valores preferenciais para a velocidade tem uma alta probabilidade, enquanto uma distribuição uniforme é assumida para o restante do intervalo

$[0, V_{max}]$.

MMIG

O modelo Markoviano de Mobilidade Individual Genérico (MMIG), proposto por Campos e de Moraes em [25], usa uma cadeia de Markov de parâmetro discreto para simular a movimentação de um nó. Com isso, a memória contida nos estados da cadeia de Markov só é usada para dar um senso de direção ao deslocamento de um nó.

Dois cadeias de Markov são utilizadas, uma para deslocamentos na coordenada x e outra para deslocamentos na coordenada y . A cada intervalo de tempo é escolhido um deslocamento nas direções x e y , e esse deslocamento depende do estado da cadeia. Um dos parâmetros do modelo é a probabilidade m . Essa é a probabilidade de mudança para os estados à esquerda, e a mesma probabilidade é a de mudança para os estados à direita. A probabilidade de permanecer no mesmo estado é $1 - 2m$. Um conjunto de valores de incrementos na posição inicial do nó ($[0, n]$) representa a variação da velocidade e segue o comportamento de uma série geométrica onde o valor inicial é 1 e o valor máximo é n . Com esse modelo é possível definir uma movimentação suave com pequenas variações da velocidade.

Levy Walk

Estudos mostraram que o padrão de movimentação humano tem similaridades estatísticas com Levy walks [26], que é o padrão de mobilidade observado em animais como macaco-aranha e gaivotas.

No modelo Levy Walk temos a definição de tempo de vôo, onde o vôo é a distância que o pedestre percorre sem fazer pausa ou mudar a direção do movimento. O modelo seleciona o tamanho do vôo e o tempo do vôo a partir de duas distribuições Levy com os coeficientes α e β respectivamente. Este é um modelo realístico, que possui muitos parâmetros para se aproximar às características de movimentação humana. Em contrapartida, por possuir muitos parâmetros é um modelo complicado

e muito difícil de ajustar.

2.1.3 Modelos de Mobilidade Com Dependência Espacial

Nos modelos apresentados até agora, um nó move-se independentemente dos outros nós, ou seja, a localização, velocidade e direção não são afetados por outros nós na vizinhança. Portanto, esses modelos não capturam alguns cenários realistas de mobilidade. Por exemplo, em uma estrada para evitar acidentes, a velocidade de um veículo não deve ultrapassar a velocidade do veículo a sua frente. O modelo apresentado a seguir é um exemplo dessa classe de modelos de mobilidade.

Reference Point Group Mobility Model

De acordo com a observação de que os nós móveis em MANETs tendem a coordenar o seu movimento, o *Reference Point Group Mobility Model* (RPGM) é proposto em [27]. Um exemplo de tal mobilidade é que um número de soldados pode se mover em grupo durante uma operação de guerra. Outro exemplo é o de equipes de resgate, onde bombeiros, policiais e médicos trabalham em grupos e trabalham cooperativamente.

No modelo RPGM, cada grupo tem um centro, que é um centro lógico ou um nó é o líder do grupo. A movimentação do líder ou do centro lógico determina o comportamento de movimentação do grupo todo.

2.1.4 Modelos de Mobilidade Com Restrição Geográfica

Nessa sub-seção será apresentado um modelo cujo movimento está sujeito às restrições geográficas da área de simulação. No mundo real, a maioria dos cenários apresenta algum tipo de obstáculo que impede a livre movimentação.

Pathway Mobility Model

Um modo simples de integrar restrições geográficas (obstáculos) no modelo de mobilidade é restringir a movimentação dos nós em “caminhos” (*pathways*) no mapa. O mapa é predefinido na área de simulação. Tian, Hahner e Becker et al. [28] utilizam um grafo aleatório para modelar o mapa da cidade. O grafo pode ser gerado aleatoriamente ou baseado no mapa de uma cidade real. Os vértices do grafo representam os prédios e os enlaces modelam as ruas entre os prédios. Inicialmente os nós são posicionados nos vértices do grafo, e escolhem aleatoriamente um destino. Então o nó se move pelo menor caminho até o destino, e ao chegar pausa por um tempo e escolhe um novo destino.

Ao contrário do que acontece no RWP, os nós não se movem livremente, e sim apenas pelos “caminhos” definidos. Contudo, ao chegar no destino o nó escolherá um novo destino aleatoriamente, por isso ainda existe um certo nível de aleatoriedade no modelo.

Nessa seção foram apresentados os principais modelos de mobilidade utilizados pela comunidade científica. Tendo examinado esses modelos de mobilidade, observamos que eles possuem várias propriedades e características próprias. Como consequência, cada modelo se comporta de forma diferente e isso influencia o desempenho dos protocolos e aplicações utilizados nas simulações. Por isso, uma escolha criteriosa do modelo de mobilidade a ser utilizado é necessária para cada cenário a ser estudado. Os modelos Brownian, Levy Walk, MMIG, Smooth e RWP apresentados nessa seção foram utilizados na aplicação da metodologia de análise da conectividade, como será visto nos próximos capítulos.

2.2 Análise da Conectividade

Nessa seção será feita uma revisão bibliográfica de alguns trabalhos que estudaram a conectividade em MANETs.

Em [12] é definido um *framework* com o objetivo de avaliar o impacto dos di-

ferentes modelos de mobilidade no desempenho de protocolos de roteamento de MANETs. São propostas também algumas métricas independentes dos protocolos para capturar características espaço-temporais e também do grafo de conectividade. Esse foi um dos primeiros estudos a considerar a análise da duração do caminho. Os resultados indicam que o desempenho dos protocolos pode variar drasticamente entre os modelos de mobilidade, e em decorrência disso não é possível fornecer uma classificação geral indicando qual o melhor protocolo. Baseado em resultados de simulação, os autores concluíram que a duração de um caminho com quatro ou mais saltos pode ser aproximado por uma distribuição exponencial. Porém os autores não consideraram o ajuste com nenhuma outra distribuição conhecida.

A principal conclusão deste trabalho citado é que a mobilidade influencia o grafo de conectividade, que por sua vez influencia o desempenho dos protocolos de roteamento. Essa é uma conclusão importante e que motiva um estudo mais detalhado das propriedades topológicas do grafo de conectividade.

Por propor métricas totalmente independentes do protocolo de roteamento, o *framework* permite avaliar o comportamento de movimentação dos modelos de mobilidade. Essa é uma valiosa contribuição, mas é importante ressaltar que nesse trabalho citado foram utilizadas apenas mobilidade gerada através de modelos de mobilidade, e não mobilidade real.

Sadagopan et al. em [29] investigou características fundamentais da conectividade em MANETs. Esse estudo examinou com mais detalhes a duração do enlace e duração do caminho conforme definidas por [12], e mostra que, ao contrário do que se pensava, a duração dos enlaces não é exponencialmente distribuída. O estudo conclui também que a duração do menor caminho é exponencialmente distribuída para modelos de mobilidade aleatória. Esse trabalho apresenta resultados importantes, porém apenas para mobilidade sintética. Além disso, apenas dois aspectos da conectividade são analisados: a duração do enlace e do caminho.

A maior parte dos estudos envolvendo MANETs foca em espaços abertos. Bohacek e Sridhara [30] estudam MANETs em ambientes urbanos. São comparadas a conectividade em cenários abertos e fechados para MANETs, e a heterogeneidade

dos grafos que representam a rede é enfatizada. São estudadas também algumas propriedades topológicas, e o estudo conclui que as áreas onde os dispositivos permanecem conectados são áreas como corredores ou caminhos, por onde as pessoas passam, formando um *backbone* natural. Nesse estudo também não é utilizada mobilidade real.

O impacto da mobilidade no tempo de vida dos enlaces e rotas é de grande importância em MANETs. O primeiro estudo a usar medidas extraídas de mobilidade real para analisar o efeito da mobilidade nas distribuições do tempo de vida dos enlaces e rotas foi realizado por Lenders, Wagner e May em [31]. As rotas e enlaces podem se tornar inválidas por vários motivos como interferência ou colisões de pacotes, e não apenas devido à mobilidade dos nós. Nesse trabalho foi desenvolvido um framework para distinguir entre as quebras de enlaces causadas pela mobilidade e as causadas por interferência ou colisões. O principal resultado desse trabalho é que as distribuições do tempo de vida dos enlaces do RWP e RPGM estão bem próximas das distribuições empíricas. No entanto, os dados de mobilidade obtidos para esse estudo são as associações dos nós móveis com pontos de acesso, e não dados relativos à movimentação real dos dispositivos. É considerado que os nós móveis permanecem parados enquanto estão associados a determinado ponto de acesso, e a movimentação ocorre quando o nó troca de ponto de acesso. Portanto os resultados não podem ser generalizados para MANETs.

Santi, em [32], estudou o alcance de transmissão crítico para se obter conectividade, que é o valor mínimo comum do alcance de transmissão dos nós que produz um grafo conexo. É estudado a alteração dessa métrica na presença de mobilidade na rede, e o artigo deriva uma aproximação para o raio de transmissão crítico. Seria interessante a aplicação dos resultados desse artigo em dados reais, uma vez que o artigo se baseou em simulações utilizando RWP.

Em [9], Bettstetter investigou duas características fundamentais de redes sem fio: o grau mínimo de um nó e a conectividade. O artigo estuda o raio de transmissão dos nós para que não haja nenhum nó isolado na rede, e para atingir uma rede totalmente conectada, onde exista um caminho entre qualquer par de nós. É derivada uma

expressão analítica que permite determinar o alcance de transmissão que resulta em uma rede com determinada densidade (número de nós por unidade de área), uma rede conectada e alguns cenários foram simulados com e sem efeito de borda para verificar os resultados analíticos. Os resultados obtidos nas simulações foram bem próximos dos resultados analíticos, porém será que esses resultados se confirmam usando mobilidade real? O trabalho de Bettstetter realiza as simulações com apenas dois modelos de mobilidade: RWP e Random Direction.

Bettstetter estudou, em [33], o nível de conectividade da topologia de redes analisando o número de vizinhos de um nó, a probabilidade que exista um caminho de comunicação entre dois dados nós e a probabilidade da rede inteira estar conectada. Esse trabalho é interessante pois ele estima um valor para o raio de alcance tal que a rede permaneça conectada com determinada probabilidade. Um de seus resultados é que a mobilidade do modelo RWP diminui a conectividade em redes ad hoc enquanto que o grau dos nós aumenta.

A proposta de caracterização da mobilidade definida em [2] fez uma análise espaço-temporal microscópica da mobilidade, com o objetivo de obter maior conhecimento sobre o comportamento de movimentação de usuários em redes sem fio. Esse trabalho realiza uma investigação do comportamento espacial do movimento dos dispositivos, ou seja, está relacionada com as informações de posição do dispositivo móvel num sistema de coordenadas em relação a um instante de tempo. As medidas estudadas nesse trabalho são: velocidade, aceleração, ângulo de mudança de direção e tempo de pausa. Essas medidas são calculadas para um cenário com mobilidade real e sintética.

Fiore e Härri [34] realizam uma análise das propriedades topológicas de uma rede veicular (Vehicular Ad Hoc Network, VANET). É feita uma análise de vários modelos de mobilidade para redes veiculares usados em simulação. Os resultados mostram que a validade de estudos que utilizam mobilidade sintética em redes veiculares é contestável, e que protocolos de rede podem se beneficiar da mobilidade veicular para melhorar o desempenho. Segundo [34], a análise da conectividade pode contribuir para explicar o desempenho dos protocolos existentes, assim como

beneficiar o desenvolvimento de novas soluções para redes ad hoc.

A análise da conectividade apresentada no Capítulo 3 é baseada na análise de [34], mas Fiore e Harri realizam a análise apenas para redes veiculares enquanto aqui estudamos a conectividade utilizando mobilidade de forma geral, pode ser aplicada para mobilidade humana (pedestres), veicular, animal ou artificial (por exemplo robôs). Além disso, Fiore e Harri não usaram mobilidade real em seu trabalho.

Nessa seção foram apresentados os principais trabalhos relacionados à análise da conectividade em MANETs. Como podemos observar, o esforço de coletar dados referentes à movimentação real é recente, e poucos estudos foram realizados nesse sentido. Por outro lado, diversos estudos como os aqui apresentados reconhecem a importância e influência do padrão de mobilidade no desempenho e comportamento de MANETs, o que motiva a avaliação do nível de similaridade entre a mobilidade real e sintética.

A forma de representação de MANETs sob o aspecto da conectividade mais utilizada pela comunidade científica atualmente é a representação através de grafos, e essa forma de representação será apresentada na seção seguinte.

2.3 Representação de Redes Ad Hoc usando Teoria de Grafos

Um grafo é um conjunto de pontos, chamados vértices (ou nós), conectados por linhas, chamadas de arestas (ou arcos). Dependendo da aplicação, arestas podem ou não ter direção, pode ser permitido ou não arestas ligarem um vértice a ele próprio e vértices e/ou arestas podem ter um peso (numérico) associado. Se as arestas têm uma direção associada (indicada por uma seta na representação gráfica) temos um grafo direcionado, grafo orientado ou dígrafo.

Estruturas que podem ser representadas por grafos estão em toda parte e muitos problemas de interesse prático podem ser formulados como questões sobre certos grafos. Vejamos alguns exemplos a seguir:

- Mapa representando um conjunto de cidades ligadas por estradas. Pode-se desejar saber qual o menor caminho para ir de uma cidade a outra, entre outras coisas;
- Circuito eletrônico, onde os nós correspondem aos terminais dos dispositivos, e os arcos são os próprios dispositivos. Pode-se desejar saber se um terminal de um dispositivo está ligado a outro;
- Representação de processos em sistemas paralelos ou distribuídos (modelagem dinâmica de processos e sistemas);
- Otimização de atividades em projetos no contexto da disciplina de gerência de projetos (nós representam as tarefas e os arcos indicam as relações de dependência entre elas). Pode-se desejar saber qual o prazo mínimo para execução de todo o projeto (identificação do caminho crítico).

Grafos podem ser utilizados também na representação de redes móveis, e diferentes abordagens podem ser aplicadas. As redes ad hoc são formadas por dispositivos móveis que se comunicam entre si via rádio. Se dois nós ad hoc estão muito distantes um do outro para se comunicar diretamente, nós intermediários podem entregar suas mensagens.

Um modelo amplamente utilizado para o estudo de redes ad hoc é o chamado grafo de disco unitário [35, 36], cuja representação é feita da seguinte forma: dispositivos (nós) estão localizados em um plano Euclidiano e os nós têm raios de transmissão iguais (unitários). Eles podem se comunicar apenas se estão um no alcance de transmissão do outro (ou seja, a distância euclidiana entre eles é menor que um). Um exemplo de representação de uma topologia de rede ad hoc pode ser vista na figura 1.

Ao modelar topologias de rede que mudam frequentemente é natural pensar em grafos aleatórios. Esse tipo de grafos utiliza métodos probabilísticos para resolver problemas em teoria de grafos. Perguntas como “Quais propriedades a maioria dos grafos tem?” podem ser respondidas. Dois matemáticos húngaros, P. Erdős

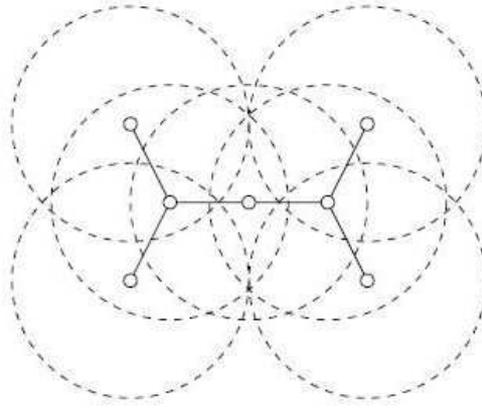


Figura 2.1: Exemplo de representação de uma topologia de rede ad hoc

e A. Rényi, foram os primeiros a estudar grafos aleatórios e usaram três modelos principais [37]:

- O modelo dinâmico começa com um grafo com n vértices e nenhuma aresta, e a cada passo um par ainda não conectado é aleatoriamente escolhido e conectado por uma nova aresta. Desse modo, um grafo sem arestas evolui aleatoriamente para um grafo completo.
- No modelo estático o número de arestas m e vértices n são dados e o grafo é escolhido aleatoriamente entre todos os grafos possíveis com m arestas e n vértices.
- Já no modelo probabilístico, uma aresta existe independentemente das outras entre qualquer par de vértices com probabilidade p , ou uma aresta não existe com probabilidade $1 - p$.

Os modelos citados acima estão relacionados, pois qualquer resultado alcançado em um dos modelos pode ser transportado para os outros. A escolha do modelo depende do problema que se deseja modelar.

Porém o maior obstáculo em aplicar a teoria de grafos aleatórios em redes ad hoc é que grafos aleatórios não permitem considerar correlações arbitrárias entre diferentes enlaces. Por exemplo, sejam u , v e w três nós em uma rede móvel, tal que v e w estão muito próximos em do outro mas u está longe. Se u alcança v , então

a existência dos enlaces (u, v) e (v, w) é correlacionada na realidade. A teoria de grafos aleatória convencional não modela essa correlação.

Uma outra forma de representar a topologia de uma MANET é utilizando grafos geométricos aleatórios[37]. É um grafo aleatório, ou seja, os nós estão distribuídos aleatoriamente na área. Além disso, é também um grafo geométrico, onde um enlace conecta cada par de nós separados por uma distância de até r metros (r é o raio de alcance dos nós). Em outras palavras, é um grafo aleatório no qual a probabilidade de existência p de um enlace entre dois nós i e j é determinada pela distância geométrica entre eles, de forma que $p = 1$ se $\|i - j\| \leq r$ e $p = 0$ caso contrário. Essa forma de representação foi utilizada no presente trabalho para a representação da conectividade da rede.

2.4 Considerações Finais

Nesse capítulo foram descritos os principais modelos de mobilidade utilizados pela comunidade científica. Alguns desses modelos apresentam problemas estudados e conhecidos pelos pesquisadores, como mudanças bruscas de direção e velocidade, distribuição espacial não uniforme dos nós e ondas de densidade. Em decorrência desses problemas, é necessário um estudo utilizando dados reais de movimentação para verificar a proximidade entre esses dados e a mobilidade sintética.

Foram apresentados também nesse capítulo os principais trabalhos sobre a análise da conectividade em MANETs. Conforme observado anteriormente, poucos trabalhos consideram a movimentação real de dispositivos, devido principalmente à dificuldade de obtenção de registros de movimentação reais e confiáveis. Porém a necessidade de estudos envolvendo dados reais é reconhecida, e recentemente um projeto da universidade de Dartmouth([19]) se propôs a reunir dados coletados para a comunidade de pesquisa. A inexistência de estudos utilizando mobilidade real e a má representação da mobilidade real pelos modelos sintéticos motivam a metodologia de análise da conectividade proposta no próximo capítulo.

Por fim, foram apresentadas as principais formas de representação de MANETs

através da teoria de grafos. A forma de representação onde a existência de um enlace depende da distância entre os nós foi a forma utilizada nesse trabalho e será apresentada no próximo capítulo.

Capítulo 3

Uma Proposta de Metodologia Para a Análise da Conectividade em Redes Móveis

INVESTIGAMOS uma propriedade fundamental e importante de redes sem fio, a conectividade da rede. Através do estudo e caracterização da conectividade, temos um maior conhecimento sobre o impacto da movimentação dos usuários no funcionamento das MANETs.

Nesse capítulo são definidas medidas para análise da conectividade, e em seguida é apresentada uma metodologia para o tratamento dessa análise.

3.1 Visão Geral

Enquanto que em redes sem fio infra-estruturadas é suficiente que cada nó tenha um enlace com pelo menos uma estação base, a situação em uma rede descentralizada ad hoc é mais complicada. Para alcançar uma rede ad hoc totalmente conectada, deve existir um caminho entre cada par de nós. A conectividade então depende do número de nós por unidade de área e do raio de alcance dos nós. Cada nó contribui para a conectividade da rede toda.

O desempenho de protocolos de redes é em geral afetado pela forma como os nós estão conectados, por isso o estudo de métricas para analisar a conectividade em uma rede móvel é de vital importância. As métricas de conectividade visam evidenciar o efeito de diferentes padrões de mobilidade no grafo de conectividade dos nós móveis.

Para observar e ter maior conhecimento sobre o impacto da movimentação de usuários na conectividade da rede, é proposto um estudo sobre a representação dessa conectividade. Assim, algumas métricas serão definidas e será realizada uma análise detalhada de cada uma delas.

3.2 Métricas Para Estudo da Conectividade

A análise de conectividade requer métricas capazes de capturar a dinâmica da topologia física da rede em questão. Para a definição formal dessas métricas, a topologia da rede no instante t foi representada pelo grafo não direcionado $G(t) = \{V, E(t)\}$, onde os nós móveis correspondem ao conjunto de vértices $V = \{v_i\}$, e enlaces de comunicação ao conjunto de arestas representado por $E(t) = \{e_{i,j}(t)\}$.

Seja a posição do i -ésimo dispositivo, no instante t , dada por $x_i(t)$ e $y_i(t)$ nas direções \vec{x} e \vec{y} , respectivamente, onde $x_i(t)$ e $y_i(t)$ são números reais e a unidade de medida é dada em metros (m) quando o movimento for de pedestres ou em quilômetros (km) quando o movimento for de veículos.

Seja R o raio de alcance de um nó. Dentro desse contexto, um enlace de comunicação é estabelecido entre os nós i e j se ambos os nós estiverem dentro do raio de alcance R um do outro. Para isso, a distância Euclidiana ($D_{i,j}(t)$) entre os nós i e j , no instante t , é calculada. A distância Euclidiana é a raiz quadrada da soma dos quadrados das diferenças de valores para cada variável. Ou seja,

$$D_{i,j}(t) = \sqrt{(x_i(t) - x_j(t))^2 + (y_i(t) - y_j(t))^2} \quad (3.1)$$

Para realizar esse estudo, a cada instante foi gerado um grafo de conectividade da rede, como uma “fotografia instantânea” da rede, e considera-se o grafo estático durante o tempo entre esses instantes. Os grafos foram implementados através de matrizes de adjacências (um exemplo pode ser visto na Figura 3.1). Nesta representação, associa-se vértices às linhas e colunas da matriz e os elementos da matriz indica se há aresta entre os dois vértices. Ou seja, é uma matriz $n \times n$ onde n é o número de vértices, e os elementos $a_{i,j}$ da matriz, onde i é a linha e j é a coluna, são:

- $a_{i,j} = 1$, se existe aresta entre os vértices i e j
- $a_{i,j} = 0$, caso contrário.

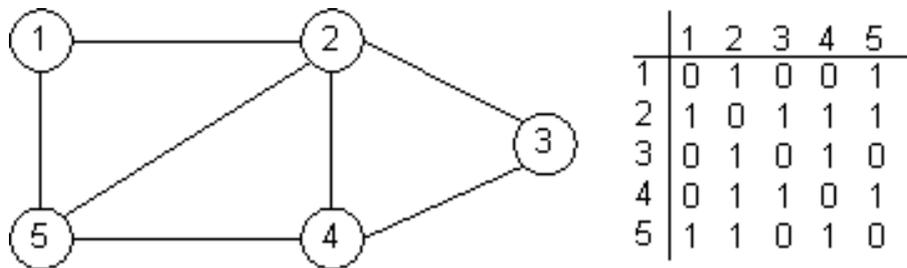


Figura 3.1: Exemplo da representação de grafos através de matrizes de adjacências

Algumas métricas serão definidas a seguir para realizar a análise da conectividade.

Grau de um nó ($G_i(t)$)

É o número de vizinhos de um nó, ou seja, é o número de dispositivos que um nó pode alcançar diretamente no instante t .

O número de vizinhos é uma característica essencial de um nó em uma rede. Se um nó não tem vizinhos, não pode trocar informações com outros nós e assim, ele pode ser inútil para toda a rede. Em um cenário móvel, um nó isolado que deseja transmitir ou receber informação deve esperar até que ele se mova ao alcance de outro nó ou outro nó se mova para perto dele. Isso pode causar um atraso na entrega de mensagens inaceitável. Por outro lado, um alto grau torna um nó resistente às mudanças devido ao movimento e as conseqüentes quebras de enlaces. Porém, aumenta a interferência dos nós vizinhos. Isso é uma das motivações para o melhor estudo dessa métrica, pois ajustando o raio de alcance de um nó podemos manipular o número de vizinhos de forma a alcançar um desempenho melhor na rede.

$$G_i(t) = \sum_{j \in V} e_{i,j}(t) \quad (3.2)$$

Número de nós isolados($I(t)$)

Representa o número de nós que não conseguem se comunicar com nenhum outro nó na rede no instante t . A existência de nós isolados é certamente uma característica indesejável em redes sem fio, pois significa que aquele nó não pode trocar informações com nenhum outro nó, nem encaminhar mensagens de outros nós. Em um cenário móvel, um nó que deseja encaminhar ou receber informações deve aguardar até que ele se mova e alcance outro nó ou outro nó se aproxime dele. Isso pode causar um atraso inaceitável na entrega de mensagens. Assim, um nó isolado é definido por $G_i(t) = 0$, e o número de nós isolados é:

$$I(t) = \sum_i G_i(t), \forall G_i(t) = 0 \quad (3.3)$$

Coeficiente de Clusterização($C_i(t)$)

O coeficiente de clusterização de um dispositivo i é usado em um grafo para medir a conectividade dos dispositivos adjacentes a i , ou seja, representa a probabilidade de dois vizinhos de um nó estarem conectados[38]. Essa métrica só pode ser calculada para nós que tenham pelo menos dois vizinhos.

Para um dado nó i , essa medida é calculada como a razão entre o número de enlaces entre os vizinhos do nó i e o número de enlaces máximo possível entre esses nós(um clique). Um exemplo do cálculo do coeficiente de clusterização em um grafo para o nó i pode ser visto na figura 3.2. As linhas cinza são os enlaces conectando o nó aos seus vizinhos, as linhas pretas são as conexões entre os vizinhos de i e as linhas vermelhas pontilhadas são os enlaces que faltam para formar o clique.

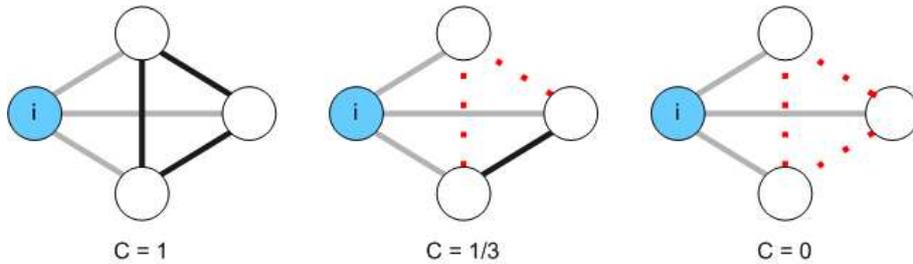


Figura 3.2: Exemplo do cálculo do coef. de clusterização para o nó i .

Seja $V(i, t)$ o número de vizinhos de i no instante t , e $E(i, t)$ o número de enlaces entre esses vizinhos no instante t . Definimos o coeficiente de clusterização como:

$$C_i(t) = \frac{E(i, t)}{V(i, t)(V(i, t) - 1)} \quad (3.4)$$

Um exemplo de aplicação dessa métrica é o estudo de redes sociais¹. Uma propriedade comum desse tipo de rede é a formação de cliques, representando círculos de amigos ou conhecidos. Um clique de um grafo é um subgrafo completo do mesmo. Essa tendência a formar cliques é quantificada pelo coeficiente de clusterização. Um alto valor para o coeficiente de clusterização em uma rede indica que essa rede tem

¹Uma rede social é uma estrutura social formada por nós (que geralmente são indivíduos ou organizações) que estão relacionadas por um ou mais tipos de interdependência, como visões, idéias, amizade ou interesses comerciais [39].

tendência para formar cliques. Essa medida tem sido muito utilizada também no estudo de redes complexas².

Número de componentes conexas

Um grafo é dito conexo, se para cada par de nós existe um caminho entre eles[37]. Caso contrário, o grafo é dito desconexo. Em termos de redes de comunicação, todos os nós de uma rede conectada podem se comunicar uns com os outros através de um ou mais saltos (múltiplos saltos). Em uma rede desconectada, podemos ter subgrafos conexos (componentes conexos), onde os nós dentro de cada subgrafo comunicam-se entre si, mas um nó em um subgrafo não consegue se comunicar com um nó de outro subgrafo.

Uma componente conexa em um grafo é um conjunto de nós tal que todos os nós conseguem alcançar todos os demais nós. Frequentemente é desejável ter uma rede conectada, por exemplo algumas avaliações de desempenho de protocolos de roteamento assumem uma topologia conectada(como em [41]). Com essa medida podemos verificar isso, pois se a rede possui apenas uma componente conexa significa que ela está conectada. Podemos verificar também se a rede possui muitas componentes com poucos nós ou poucas componentes com muitos nós. Observa-se que um nó isolado (ou seja, sem nenhum enlace conectando-o a outro nó qualquer) é, por definição, uma componente conexa, uma vez que alcança a si próprio. Por definição um grafo vazio tem zero componentes conexas.

Na figura 3.3 temos um exemplo de topologia de uma rede Ad Hoc, exemplificando também o cálculo das métricas anteriormente definidas. O nó i possui grau 3 e o nó j é um nó isolado. O grafo possui 2 componentes conexos.

Duração dos enlaces($DE(i, j, t_1)$)

A comunicação entre nós em redes Ad Hoc depende da existência de enlaces e caminhos entre os nós. A mobilidade cria um ambiente muito dinâmico, onde enlaces

²Uma rede complexa é uma rede que possui características topológicas não comuns. Características essas que redes simples não apresentam. O estudo de redes complexas é uma área nova de pesquisa inspirada pelo estudo empírico de redes reais como a Internet [40].

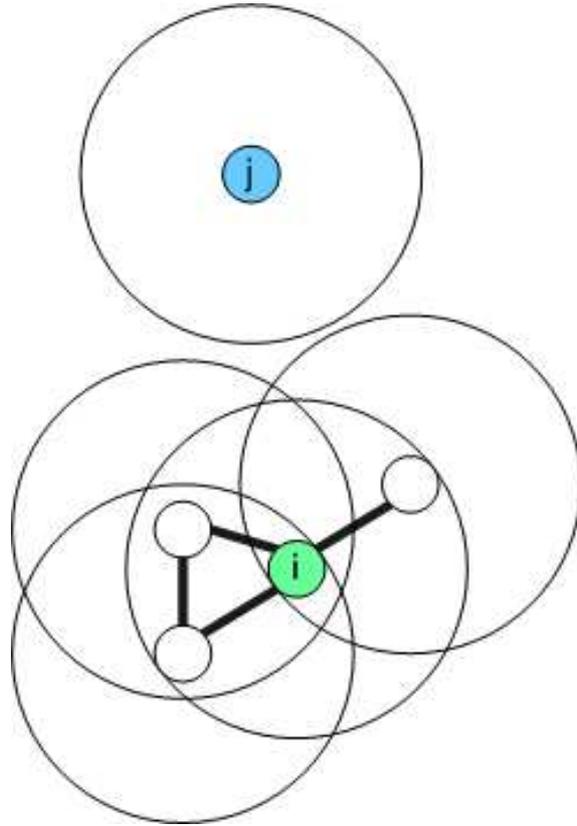


Figura 3.3: Exemplo de topologia de uma rede Ad hoc.

e caminhos podem se tornar inválidos frequentemente, influenciando os protocolos de roteamento e causando um grande impacto no desempenho da rede. Por isso, um estudo detalhado da duração dos enlaces é necessário.

Para dois nós i e j , no instante t_1 , a duração do enlace é definida como o tamanho do maior intervalo de tempo $[t_1, t_2]$ durante o qual os dois nós estão dentro do raio de alcance um do outro. Além disso, os nós não estão dentro do raio de alcance um do outros no instante anterior a t_1 e posterior a t_2 . Ou seja,

$$DE(i, j, t_1) = t_2 - t_1, \quad (3.5)$$

se $\forall t$ existe $e_{i,j}(t)$, onde $t_1 < t < t_2$

Nessa seção foram definidas cinco métricas: grau, número de nós isolados, coeficiente de clusterização, número de componentes conexas e duração dos enlaces. Essas métricas propostas tem o objetivo de caracterizar a conectividade em um ce-

nário de mobilidade, e serão utilizadas na metodologia de análise da conectividade apresentada na seção seguinte.

3.3 Proposta de Metodologia Para a Análise da Conectividade em Redes Móveis

Nessa seção será apresentada uma metodologia para análise da conectividade em um cenário de mobilidade. O uso de uma metodologia para analisar a conectividade é importante para que essa análise seja feita corretamente. A falta de planejamento, organização e transparência nos trabalhos que utilizam dados reais para o estudo de redes móveis prejudica a credibilidade dos mesmos[16].

Serão definidos abaixo alguns passos a serem seguidos para analisar a conectividade. Esses passos devem ser seguidos na ordem que são apresentados, e caso necessário pode-se voltar a algum passo anterior para realizar ajustes. A aplicação dos passos da metodologia na ordem em que são definidos é importante para que características topológicas do cenário considerado possam ser extraídas corretamente. Na Figura 3.4 podemos ver um fluxograma com as etapas da metodologia e as interações entre elas. A seguir as etapas dessa metodologia serão descritas.

1ª Etapa - Definição dos cenários de observação

O primeiro passo é definir qual o tipo de cenário no qual a conectividade será investigada. As redes móveis podem ser aplicadas em situações das mais diversas como campos de batalha, festivais, atividades ao ar livre, e ações de emergência e resgate. Essa metodologia pode ser aplicada em inúmeros cenários onde existam nós móveis, como os citados anteriormente. Por exemplo, para aplicação dessa metodologia foi definido um cenário que consistia de uma área de lazer ao ar livre. Alguns parâmetros devem ser levados em consideração, como o tamanho da área, duração do experimento e a quantidade de nós móveis.

2ª Etapa - Coleta e Tratamento de Dados

Após a definição do cenário, devemos definir como será feita a coleta de dados. Nessa etapa, deve ser usado algum sistema de localização, como por exemplo o GPS(Global Positioning System). O GPS é um sistema muito utilizado atualmente, e é o que utilizamos nesse experimento. Devemos observar que a acuidade dos dados coletados depende do aparelho utilizado. Alguns aparelhos de GPS apresentam erros de dezenas de metros, enquanto outros apenas de alguns centímetros.

Nessa etapa é importante definir também a frequência de atualização da posição, ou seja, de quanto em quanto tempo a posição do nó móvel será atualizada. A definição desse parâmetro é importante, pois quanto menor a frequência de coleta mais detalhada será a análise e mais confiáveis os resultados.

Uma vez que os dados foram coletados, deve ser feita uma filtragem das amostras, que é a escolha dos dados que serão efetivamente usados no estudo. Os dados inconsistentes das amostras devem ser eliminados, como erros de gravação em arquivos e discrepâncias causadas por erros no cálculo da posição. O sistema de localização GPS algumas vezes apresenta erros devido à imprecisão quanto a localização dos satélites, e ao fenômeno de multi-caminhos que ocorre quando o sinal transmitido sofre interferência de obstáculos perto do aparelho. Por isso, sempre que possível deve ser aplicado algum tipo de correção nos dados coletados e deve ser feita uma filtragem para remover esses erros.

Além disso, no caso de usar um aparelho de GPS para coletar os dados, é preciso fazer uma interpolação de pontos, pois o GPS precisa de linha de visada direta com os satélites para informar a posição do usuário, e em alguns momentos isso não é possível.

3ª Etapa - Cálculo das métricas da conectividade

A etapa de cálculo das métricas da conectividade consiste na extração de algumas métricas que permitam caracterizar a conectividade. A rede é modelada como um grafo não direcionado, onde um enlace de comunicação existe se um nó móvel está dentro do raio de alcance de outro nó móvel. As métricas calculadas são: grau

médio dos nós, número de nós isolados, coeficiente de clusterização, número de componentes conexas e duração dos enlaces. As definições para cada uma dessas métricas encontram-se na seção 3.2. São calculadas diversas medidas estatísticas, como média, desvio padrão, variância, coeficiente de variação, valores mínimo e máximo, funções de distribuição empírica e cumulativa de cada métrica definida, de forma a caracterizar detalhadamente cada uma dessas métricas.

4ª Etapa - Ajuste dos parâmetros dos modelos de mobilidade

Cada modelo de mobilidade possui parâmetros próprios, que determinam como é obtida a mobilidade. Esses parâmetros nem sempre são intuitivos, e em alguns casos é necessário definir mais de uma dezena de parâmetros, o que torna essa tarefa muito complexa. O objetivo dessa fase da metodologia, é ajustar os parâmetros dos modelos de mobilidade para comparar a conectividade gerada por dados reais com a gerada por dados sintéticos. Um método de ajuste da mobilidade sintética em relação a dados reais é proposto em [42].

O método funciona da seguinte maneira: são estipulados, com base nas medidas obtidas na análise dos dados reais, intervalos de valores para cada parâmetro do modelo de mobilidade. Serão geradas então simulações para esse modelo de mobilidade usando todas as combinações de parâmetros dentro dos intervalos definidos. Então é calculado o erro médio quadrático (*Mean Square Error* - MSE) para cada simulação com relação aos dados reais. O método retorna os parâmetros de cada modelo de mobilidade que melhor se ajustam aos dados reais.

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

$$MSE(f'(x)) = \frac{\sum_1^N \|f'(x) - f(x)\|^2}{N}, \quad (3.6)$$

onde N é o número de amostras comparadas.

Uma vez que temos o conjunto de parâmetros que melhor se adequa aos dados obtidos da mobilidade real, utilizamos esses parâmetros para a simulação. Essa

técnica deve ser repetida separadamente para cada um dos modelos que se deseja analisar.

5ª Etapa - Cálculo das métricas da conectividade sobre os dados simulados

A aplicação das mesmas medidas calculadas para os dados reais devem ser utilizadas agora nos dados sintéticos. Podemos identificar com esses resultados como é o comportamento da conectividade obtida utilizando mobilidade sintética e posteriormente compará-las com a obtida utilizando os dados reais.

6ª Etapa - Comparação entre a conectividade através da mobilidade real e sintética

Nesse estágio comparamos os resultados da aplicação da métricas sobre os dados reais(3ª Etapa) e mobilidade sintética(5ª Etapa). Podemos então avaliar o quão próximo estão os modelos de mobilidade dos dados reais sob o aspecto da conectividade.

Caso após esse estágio os resultados não sejam satisfatórios, pode-se voltar ao estágio 4 para reajustar os parâmetros dos modelos de mobilidade. Podem ser definidos novos intervalos de variação dos parâmetros e o incremento utilizado para gerar as simulações.

3.4 Considerações Finais

Nesse capítulo foi apresentada uma proposta de metodologia de análise da conectividade em um cenário de mobilidade, bem como métricas que caracterizam essa conectividade e devem ser utilizadas na metodologia. As métricas foram definidas com o objetivo de obter mais informações a respeito da conectividade dos dispositivos em uma MANET sob o ponto de vista topológico. Uma primeira versão desse trabalho foi apresentada em [43].

A metodologia proposta pode ser aplicada para obter maior conhecimento sobre a conectividade em um cenário utilizando mobilidade real ou sintética, fornecer

informações importante para o desenvolvimento de novos modelos de mobilidade ou para melhoria dos existentes, assim como para verificar a proximidade dos modelos de mobilidade com a mobilidade real em determinado cenário.

No capítulo seguinte será descrito um estudo de caso onde dados de movimentação de um cenário de mobilidade real foram capturados e analisados segundo a metodologia proposta. No Capítulo 5 serão apresentados resultados utilizando mobilidade sintética, e esses resultados serão confrontados com os obtidos através da mobilidade real.

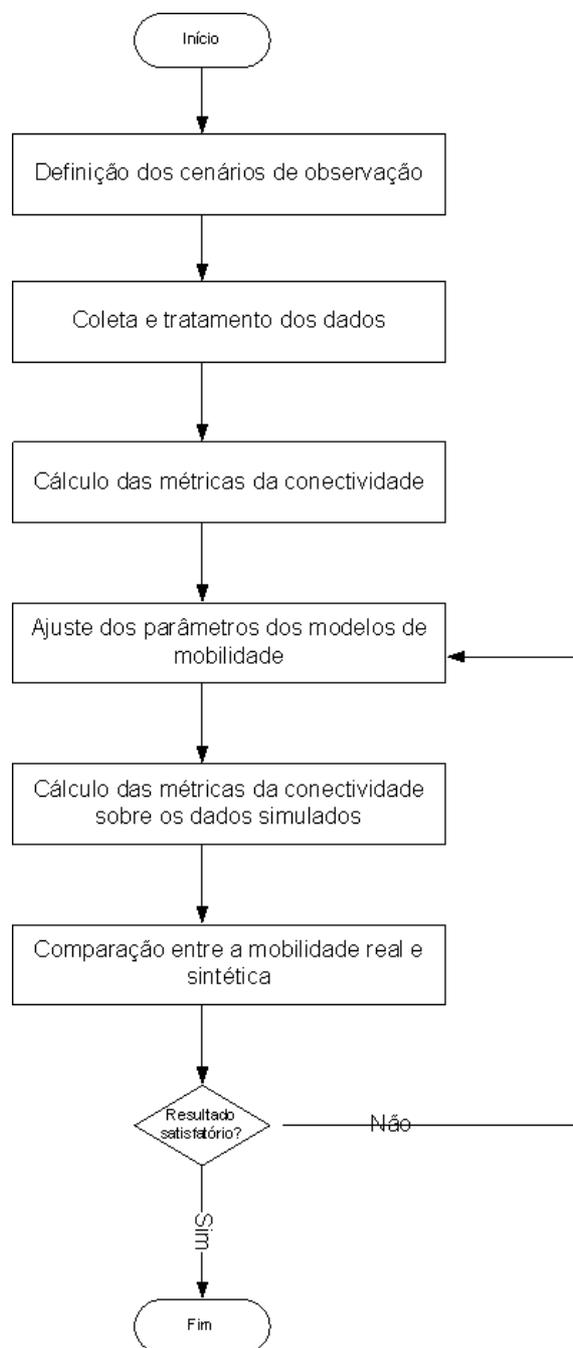


Figura 3.4: Fluxograma das etapas da metodologia proposta

Capítulo 4

Análise da Conectividade da Mobilidade Humana com Base em Dados Empíricos

PARA motivar o uso da metodologia de análise da conectividade foi realizado um conjunto de experimentos de forma que a metodologia pudesse ser aplicada em dados reais. Esses experimentos serão descritos na próxima seção, e em seguida serão apresentados os resultados obtidos da aplicação da metodologia.

4.1 Descrição dos Experimentos

O cenário definido para coleta de dados de mobilidade real foi de uma área de lazer a céu aberto, onde pessoas caminhassem livremente pela área, parando onde e quando desejassem.

O parque faz parte do Solar da Boa Vista, residência real e dos imperadores do Brasil. Atualmente, a Quinta da Boa Vista funciona como um parque com muitas árvores, lagos e grutas, e abriga ainda o Jardim Zoológico da Cidade e o Museu Nacional (ver Figura 4.1).



Figura 4.1: Fotos da Quinta da Boa Vista[1]

A coleta de dados ocorreu entre os meses de janeiro e maio de 2008, no horário de 09h às 16h utilizando um dispositivo GPS (*Global Positioning System*) do fabricante *Trimble*, modelo Geo XM (ver Figura 4.2). O dispositivo GPS funciona apenas em linha de visada dos satélites, por isso a coleta de dados deve ser em uma área aberta e deve ser feito um planejamento de satélites. De acordo com o planejamento (que pode ser feito utilizando o software GPS Pathfinder Office[44]), o melhor horário

possível para coletas no horário de funcionamento do parque é de 9h às 16h. No entanto, foi observado que em certas áreas o dispositivo GPS apresentava instabilidade mesmo com muitos satélites. Ou seja, a estabilidade do dispositivo depende também do posicionamento dos satélites. Além disso, o céu deve estar com poucas nuvens para um melhor funcionamento do GPS.

Para a coleta de dados foi elaborada uma descrição do projeto para informar as pessoas sobre a pesquisa, e um termo de consentimento livre e esclarecido autorizando a utilização das informações coletadas de forma anônima.



Figura 4.2: Dispositivo GPS utilizado na coleta de dados

Para participar do experimento, as pessoas foram informadas sobre o projeto, preencheram o termo de consentimento livre e esclarecido, e carregaram o dispositivo GPS dentro de uma bolsa por até 20 minutos. O pesquisador acompanhou o experimento alguns metros atrás do participante. Durante esse período as pessoas deveriam andar livremente e parar onde e quando quisessem. O dispositivo GPS foi configurado para coletar informações sobre a localização geográfica a cada 1 segundo. Aproximadamente 120 pessoas caminhando pelo parque foram aleatoriamente escolhidas para participar da pesquisa como voluntárias. Porém apenas 100 desses traces foram utilizados nesse estudo, pois os demais não ultrapassaram 600 segundos de coleta de dados. A área total do parque é de 600m x 800m. Podemos ver na Figura 4.3 um mapa aereo do local do experimento, onde as linhas

na cor branca representam a movimentação dos nós móveis. Pode-se observar que existem áreas onde a concentração de pedestres foi maior. Essas áreas favorecem a formação de componentes conexas, e indicam um alto valor para o grau dos nós e coeficiente de clusterização. Ao mesmo tempo, podemos observar que existem outras áreas onde os nós provavelmente permaneceram isolados. Essas são algumas características inerentes ao cenário real estudado.



Figura 4.3: Amostras de traces de GPS do Parque da Quinta da Boa Vista[2]

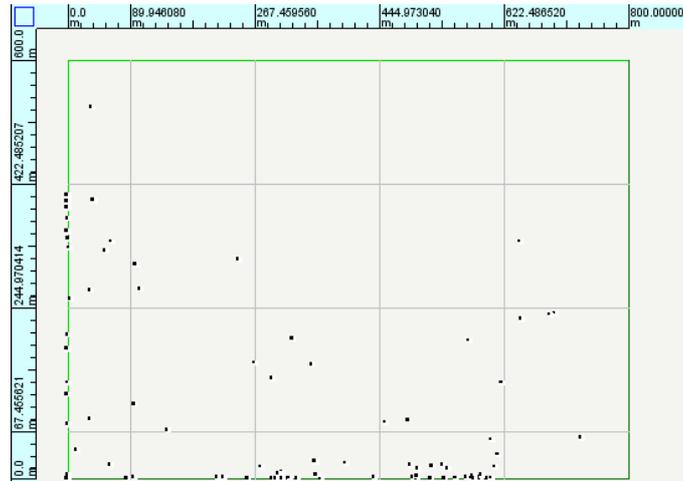
Após a coleta dos dados, foi aplicada a correção diferencial utilizando o software GPS Pathfinder Office[44], para aumentar a precisão dos dados. A correção ocorre da seguinte forma: o software faz o download de um arquivo de posição dos satélites do site do fabricante, e corrige os dados coletados com essas posições mais precisas. Isso permitirá a obtenção da conectividade de maneira mais acurada.

Observou-se que, mesmo depois da correção diferencial, algumas posições registradas pela aparelho GPS estavam incoerentes. Por exemplo, um ponto registrado

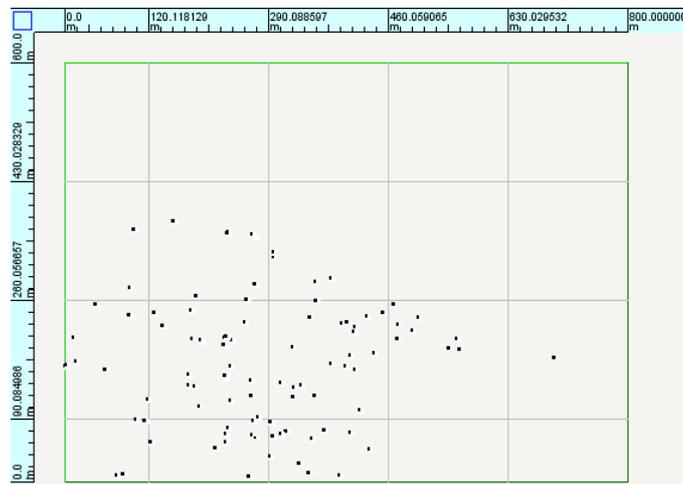
em uma posição muito longe, que uma pessoa não conseguiria alcançar andando. Para corrigir esses erros do GPS, foi implementado um filtro de velocidade, em que quando a velocidade de deslocamento entre dois pontos fosse maior que $2,5m/s$, esse ponto fosse ignorado. Foi necessário também fazer uma interpolação dos pontos, para que tivéssemos as medidas de localização em todos os momentos. Isso porque devido a forma como o aparelho de GPS funciona (com linha de visada dos satélites), em alguns momentos o aparelho não consegue definir a posição do usuário. A análise da conectividade requer que tenhamos os registros de posição de todos os pontos, uma vez que a cada instante é calculado um grafo de conectividade da rede para que esse seja analisado.

Na Figura 4.4 podemos ver como os nós estão posicionados na área do experimento no início, e nos instantes 300 e 600 segundos. A Figura sugere que os nós tendem a se dispersar pela área do experimento. No instante inicial os nós estão concentrados, a maioria juntos, no instante $t = 300s$ os nós apresentam-se mais espalhados, com uma concentração maior no centro da área do experimento, e no instante $t = 600s$, os nós espalham-se mais um pouco, e temos poucos nós no centro da área. A distribuição dos nós móveis pela área dos experimentos (a dispersão ou concentração dos nós) determina as características de conectividade dos experimentos. Por exemplo, caso os nós móveis estejam concentrados em uma pequena parte da área, a tendência é que esses nós tenham um grau maior, um alto valor para o coeficiente de clusterização e que sejam formadas poucas componentes conexas.

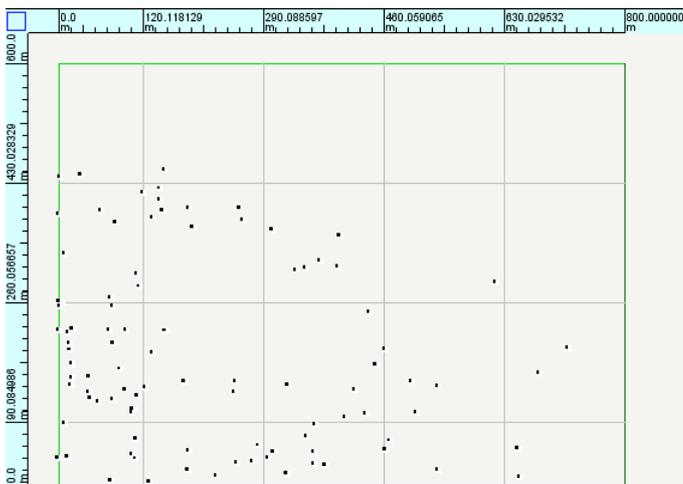
Os dados de mobilidade utilizados nesse trabalho foram coletados e apresentados em [2], que estudou o comportamento de movimentação de usuários em redes sem fio e fez uma análise espaço-temporal microscópica da mobilidade.



(a) No instante inicial



(b) No instante 300s



(c) No instante 600s

Figura 4.4: Posicionamento dos nós na área do experimento em diferentes instantes de tempo

4.2 Descrição da Obtenção dos Dados Sobre a Conectividade da Rede

Os resultados apresentados na próxima seção foram obtidos utilizando os dados coletados no experimento descrito na seção anterior variando o raio de alcance de nós. O raio de alcance é um parâmetro que pode ser ajustado em cada nó, e influencia diretamente a topologia da rede. Por isso, estudando a variação do raio de alcance dos nós podemos por exemplo determinar para um cenário específico o menor raio que mantém a rede conectada. O raio de alcance também é um parâmetro importante em redes móveis pois o consumo de energia é um dos maiores desafios desse tipo de redes. O raio de alcance dos nós foi configurado para os seguintes valores: 25, 50, 75, 100, 125 e 150 metros. Esses valores para o raio foram configurados para analisar as métricas grau médio dos nós, número de nós isolados, coeficiente de clusterização, número de componentes conexas e duração do enlace.

Para auxiliar no cálculo das métricas, foram gerados grafos de conectividade a cada instante do experimento. Esses grafos são gerados da seguinte maneira: é calculada a distância entre cada par de nós, se essa distância for menor que o raio de alcance configurado, existe um enlace de comunicação entre esses nós. Os grafos foram implementados através de matrizes de adjacências, que são calculadas da seguinte maneira: as linhas e colunas da matriz representam os vértices do grafo (os nós móveis) e os elementos da matriz indicam se há aresta entre os dois vértices (se existe enlace de comunicação entre os nós). Assim, na linha i da matriz de adjacência do instante t se o valor do elemento da matriz na coluna j é 1 significa que esses dois nós são vizinhos no instante t . As métricas de conectividade são calculadas a cada instante de tempo a partir desses grafos gerados.

Na análise das distribuições cumulativas dessas métricas foi utilizado somente o valor de 100 metros, que é um valor usualmente utilizado em redes sem fio. Foram utilizados scripts implementados na linguagem AWK e software MATLAB para o cálculo das métricas.

Para fazer a comparação entre os dados reais e algumas funções distribuições

de probabilidade conhecidas, foram escolhidos parâmetros para essas distribuições, de forma que se aproximassem ao máximo aos dados reais. Para a escolha de parâmetros foi utilizado o método da máxima verossimilhança (*Maximum Likelihood Estimation* - MLE). O método utilizado para verificar a distribuição que melhor se ajusta aos dados reais foi o erro médio quadrático (*Mean Square Error* - MSE). O MSE é calculado da seguinte maneira: são calculadas as duas distribuições cumulativas que se deseja comparar, e então calcula-se a diferença entre cada ponto das curvas. Essa diferença é elevada ao quadrado e é calculada a média entre todos os pontos. Esses resultados podem ser vistos na Tabela 4.1, onde estão grifados os valores das distribuições que melhor se ajustaram aos dados reais para cada métrica. Esses resultados serão comentados mais adiante.

Tabela 4.1: Valores de MSE obtidos para as métricas de conectividade sobre os dados reais

Métrica/Distribuição	Exponencial	Gamma	Lognormal	Normal	Weibull
Grau médio dos nós	0,006502	0,004297	0,027535	0,001924	0,002019
Número de nós isolados	0,009709	0,010075	0,039879	0,017511	0,016336
Coef. de clust.	0,081017	0,000722	0,001197	0,000429	0,001153
Núm. comp. con.	0,035500	0,010721	0,009780	0,013054	0,012202
Dur. dos enlaces	0,000787	0,000935	0,004042	0,007307	0,000859

4.3 Resultados

Apresentaremos a seguir os resultados referentes às métricas calculadas sobre os dados de mobilidade real.

O grau médio por nó a cada segundo pode ser visto na Figura 4.5. O grau médio aumenta durante o experimento e depois decai novamente ao patamar inicial. Esse comportamento ocorreu devido às características específicas da área do experimento investigado. O parque onde foram coletados os dados possui caminhos por onde os

pedestres andam, e esses caminhos se cruzam na metade da área do parque. Por isso em torno da metade do tempo do experimento, muitos pedestres estavam situados perto do centro do parque, causando um aumento no grau médio por nó. Esse padrão se torna mais acentuado conforme aumentamos o raio de alcance dos nós.

Além disso, a Figura 4.6 apresenta a distribuição cumulativa empírica do grau dos nós utilizando raio de alcance de 100m, e segundo o método MSE, a distribuição Normal foi a que se ajustou melhor a esses dados reais (ver Tabela 4.1).

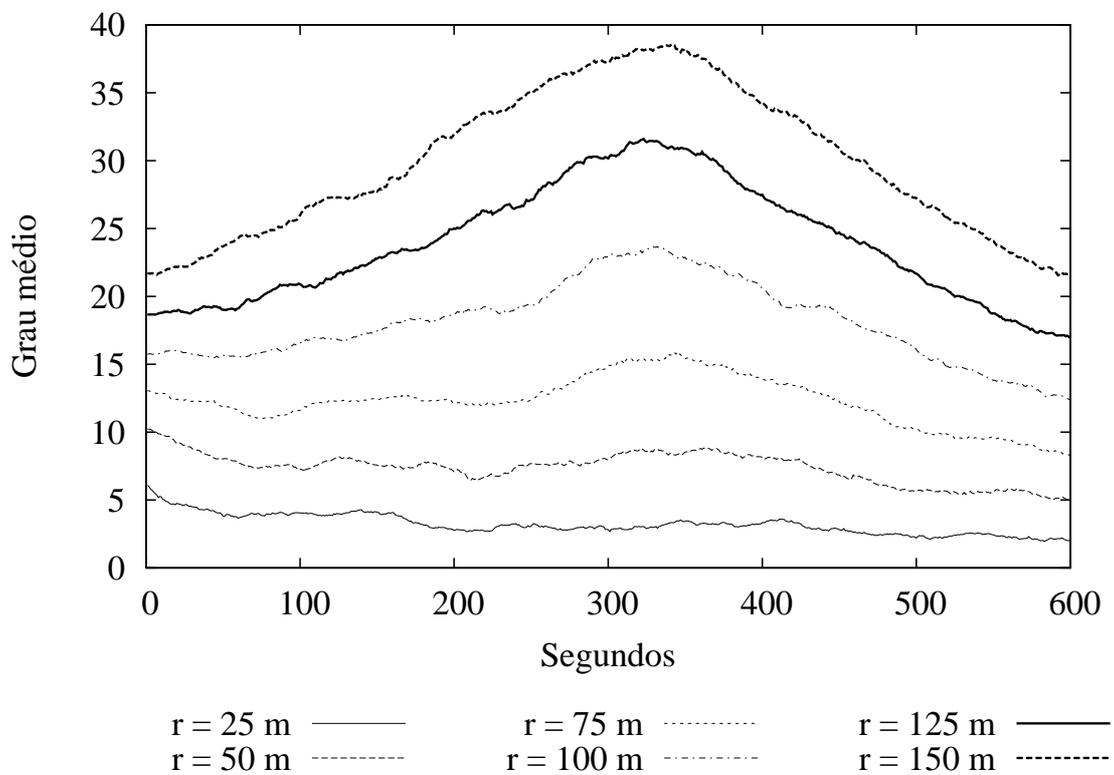


Figura 4.5: Grau médio por nó a cada segundo parametrizado em r (raio de alcance dos nós)

Podemos ver na Figura 4.7 a média do coeficiente de clusterização, número de nós isolados e do número de componentes conexas para diferentes valores do raio de alcance. Observa-se, que conforme o raio de alcance aumenta, temos menos nós isolados e um menor número de componentes conexas. Assim, a rede tende a formar menos componentes conexas, sendo que cada componente possui um número maior de nós. Essa relação do aumento do raio de alcance com o número de nós isolados e o número de componentes conexas era esperada e é bem intuitiva. Observa-se

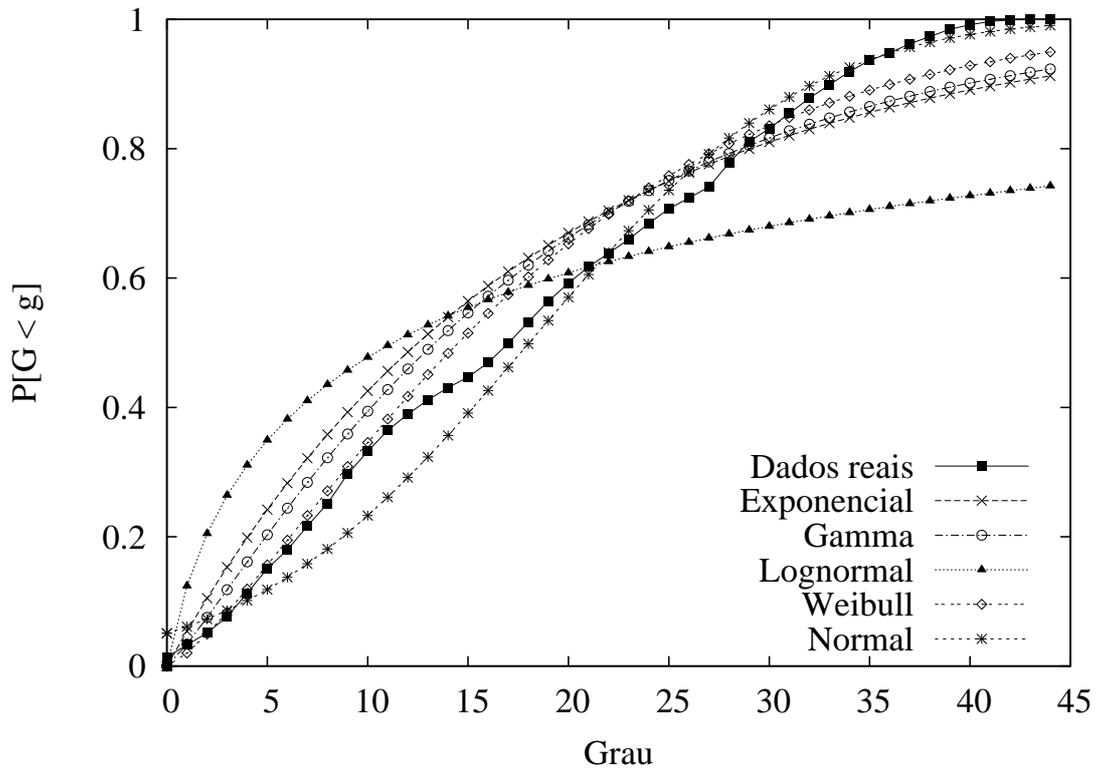


Figura 4.6: Distribuição cumulativa do grau para raio de 100m

também nessa figura que não há uma variação muito grande na média do coeficiente de clusterização. O valor médio para todos os raios analisados se manteve entre 0,75 e 0,80.

Na Figura 4.8 podemos observar que o grau e a duração dos enlaces aumenta proporcionalmente de acordo com o aumento do raio de alcance. Esses resultados confirmam a importância do raio de alcance no grau dos nós na rede, e indicam que os nós se movimentam não aleatoriamente, e sim com um propósito (seguem trilhas ou percorrem o mesmo caminho que outras pessoas percorreram por exemplo), pois a duração dos enlaces aumentou também consideravelmente quando aumentamos o raio de transmissão.

Na Figura 4.9 é mostrada a distribuição cumulativa empírica do número de nós isolados para o raio de alcance de 100m comparada a cinco funções de distribuição. Segundo o método MSE (ver Tabela 4.1), a distribuição Exponencial foi a que se aproximou mais dos dados reais.

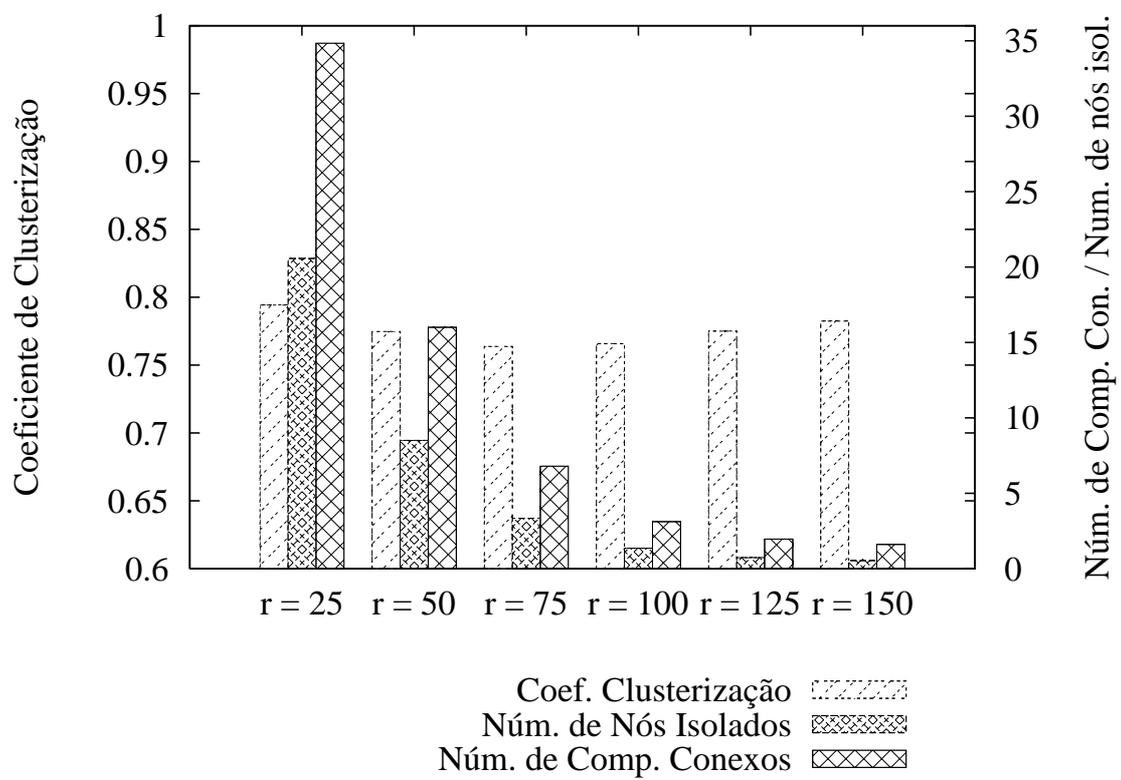


Figura 4.7: Estatísticas das métricas coeficiente de clusterização, núm. de nós isolados e núm. de componentes conexas para diferentes valores do raio de alcance (r) em metros

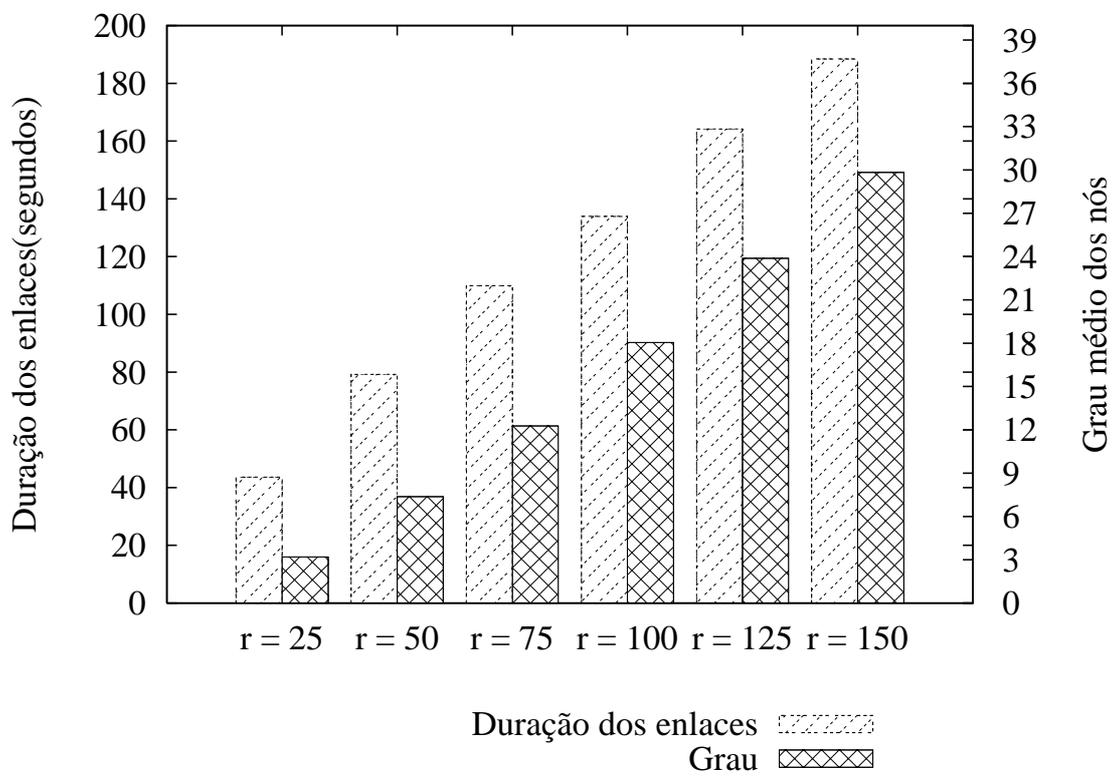


Figura 4.8: Estatísticas das métricas grau e duração dos enlaces para diferentes valores do raio de alcance (r) em metros

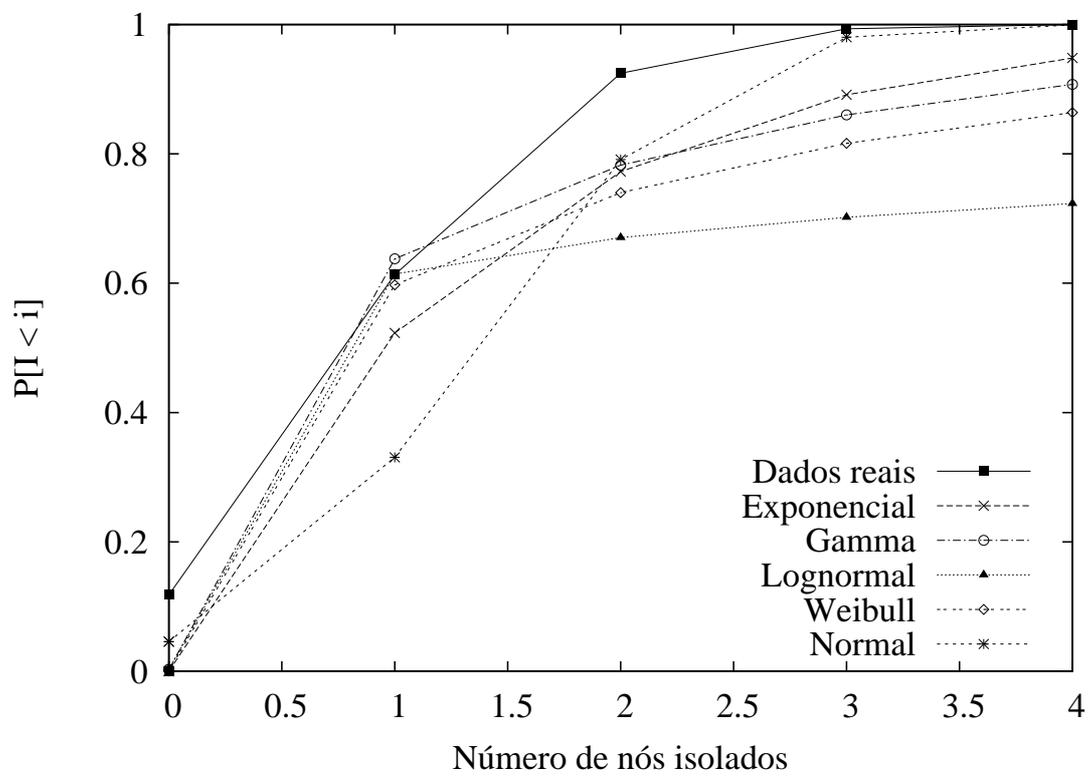


Figura 4.9: Distribuição cumulativa do número de nós isolados para raio de alcance de 100m

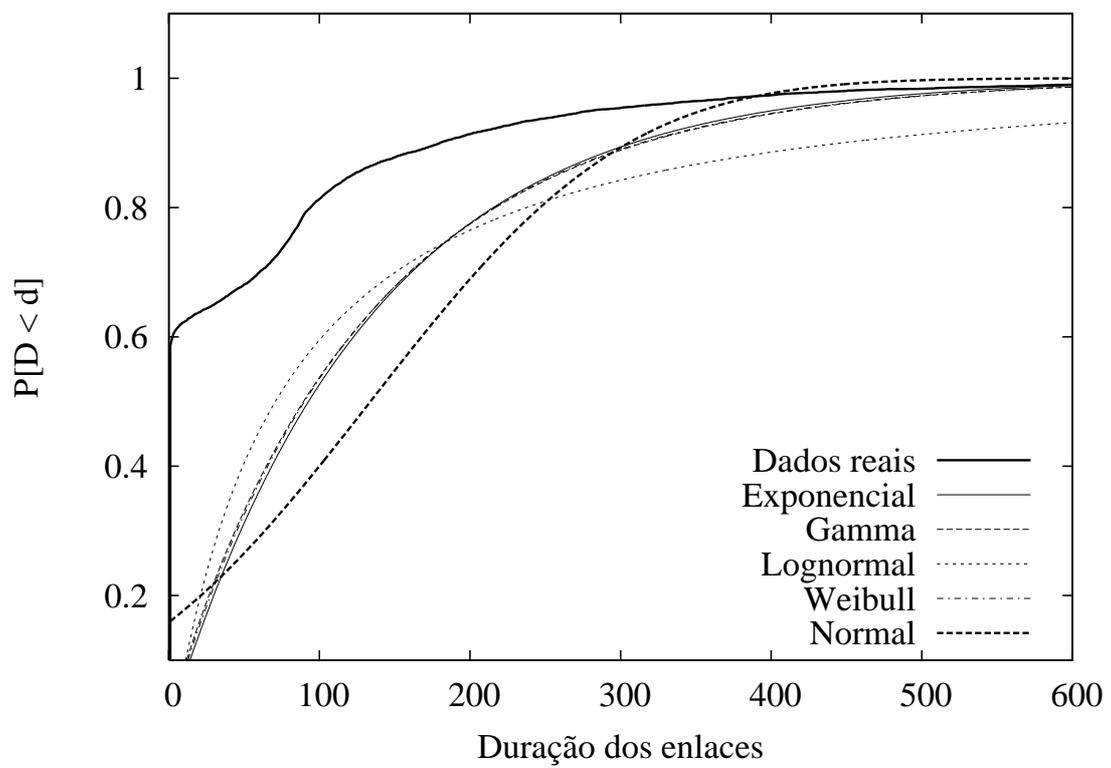


Figura 4.10: Distribuição de probabilidade da duração dos enlaces para raio de alcance de 100m

A distribuição cumulativa empírica da duração dos enlaces para raio de alcance de 100m pode ser vista na Figura 4.10. Podemos observar que cerca de 60% dos enlaces tem duração de menos de 10 segundos, o que caracteriza os enlaces que se formam entre nós se movimentando em direções diferentes. Os enlaces se formam e se desfazem em poucos segundos, conforme os nós móveis se aproximam e se afastam uns dos outros. Observa-se também que 80% dos enlaces tiveram a duração até 100 segundos, demonstrando que alguns nós mantiveram-se próximos por algum tempo. Isso se deve às características do local onde foi realizado o experimento. No parque existem caminhos que as pessoas costumam seguir, o que favoreceu a manutenção de alguns enlaces por um longo período. A distribuição que melhor se ajustou aos dados reais foi a Exponencial, segundo a Tabela 4.1.

Na Figura 4.11, temos a média do coeficiente de clusterização a cada segundo para os diferentes valores de raio de alcance. Observa-se que a variação do coeficiente de clusterização diminui conforme aumentamos o raio. No caso do raio de 25m, a variação é muito maior que no caso do raio de 150m, e comparando a Figura 4.11 e a Figura 4.7, observamos que apesar dessa variação, valores médios para o coeficiente de clusterização se mantiveram entre os valores 0,75 e 0,80 para os diferentes raios de transmissão. Os valores para os raios 50, 75 e 125 foram omitidos para facilitar a visualização da Figura.

De acordo com a Figura 4.12, que mostra a distribuição cumulativa empírica do coeficiente de clusterização, podemos observar que existe uma grande concentração de nós a partir de 0,6, sendo que no valor 1 ocorre um salto, indicando uma probabilidade grande de todos os vizinhos de determinado nó estarem conectados. Mais especificamente para o caso do raio de alcance de 100 metros, o valor médio para o coeficiente de clusterização é 0,77, com uma variância muito baixa, de apenas 0,02. Como pode ser observado na Figura 4.11, a média do coeficiente de clusterização a cada segundo é praticamente constante, variando entre 0,7 e 0,8, mesmo com a movimentação dos nós e a conseqüente variação do grau de cada nó. Com relação ao ajuste das distribuições conhecidas, a distribuição Exponencial para essa métrica não foi apresentada por não se ajustar aos dados. A distribuição que melhor se ajusta aos dados reais segundo essa métrica é a distribuição Normal.

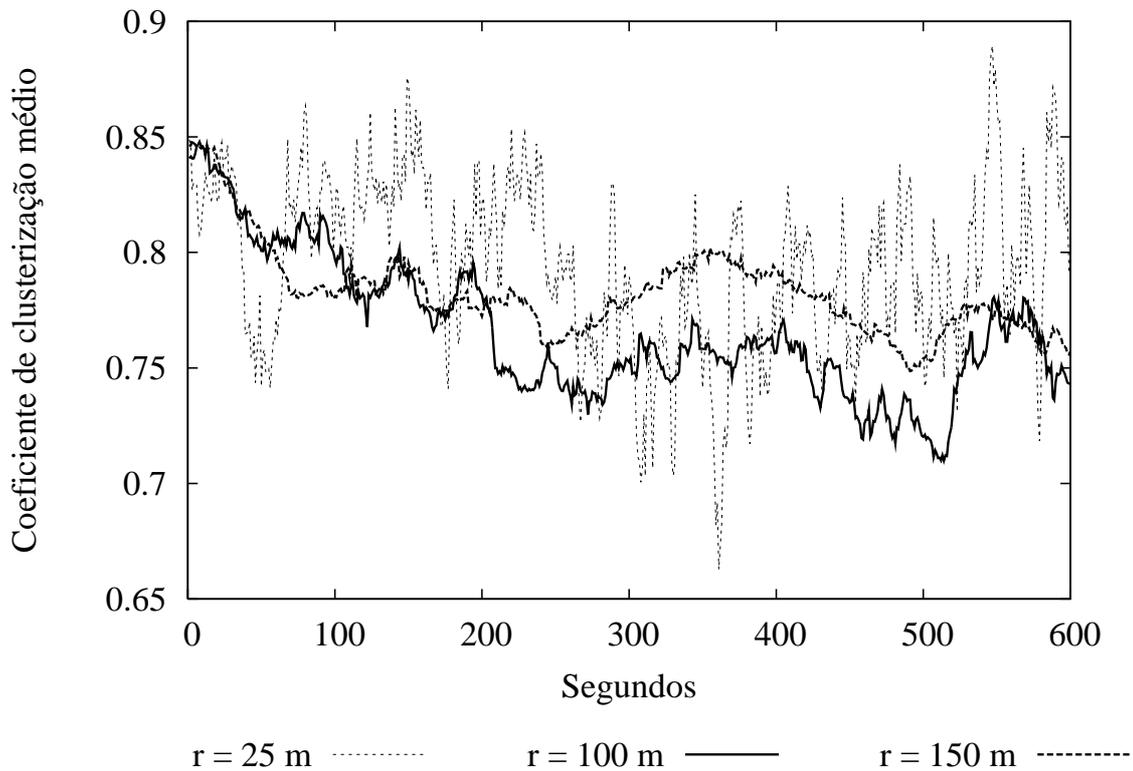


Figura 4.11: Coeficiente de clusterização médio a cada segundo parametrizado em r (raio de alcance dos nós)

Na Tabela 4.2 pode-se ver as estatísticas detalhadas de cada métrica estudada para o raio de 100 metros. Somando às observações anteriores, podemos destacar que a variância obtida para o grau dos nós e a duração dos enlaces foi um valor muito alto, enquanto que para o coeficiente de clusterização um valor muito baixo. Podemos observar também que o valor máximo para o número de componentes conexas foi 6, demonstrando que foram obtidas poucas componentes conexas.

Nesse capítulo foi descrito um estudo de caso onde a metodologia proposta foi aplicada. Obtivemos resultados sobre o grau, número de nós isolados, coeficiente de clusterização, número de componentes conexas e duração dos enlaces. Foram calculadas medidas como média, variância e desvio padrão, bem como as distribuições cumulativas empíricas das métricas definidas. É importante salientar que os resultados obtidos nessa análise são específicos para o estudo realizado e que conclusões abrangentes não devem ser feitas, visto que os resultados podem ser diferentes para outros cenários reais. Dando continuidade à aplicação da metodologia, no próximo

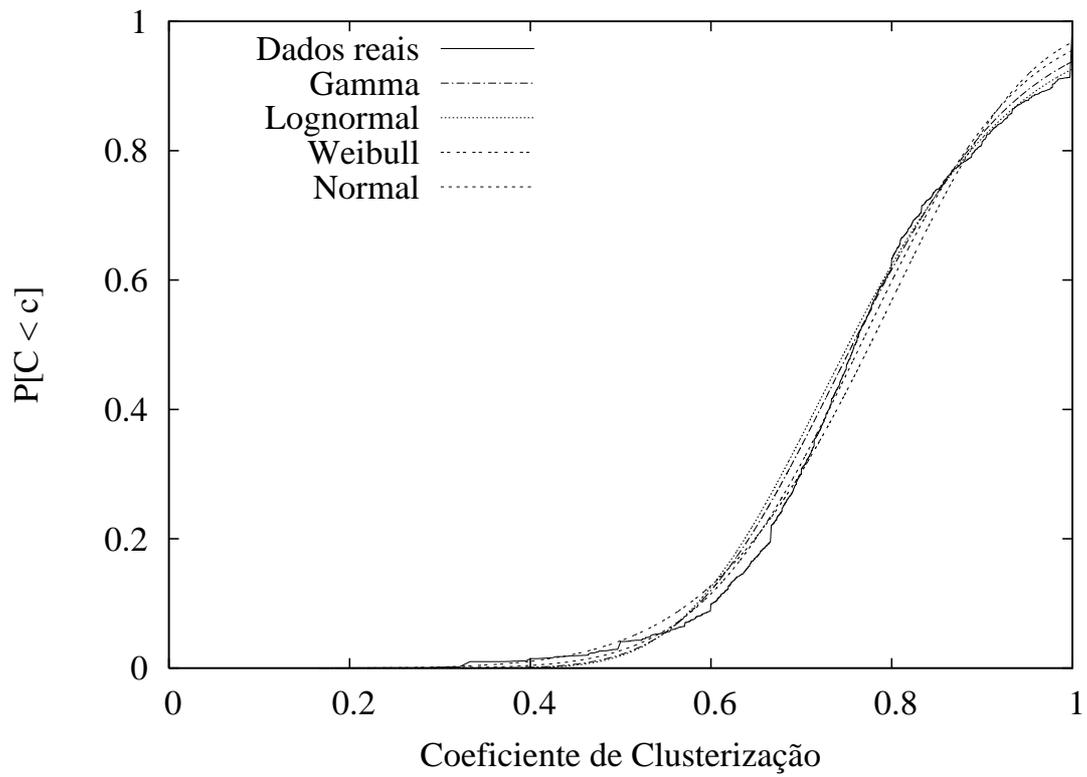


Figura 4.12: Distribuição cumulativa do coeficiente de clusterização para o raio de alcance de 100m

capítulo será realizado o estudo do mesmo cenário utilizando mobilidade sintética.

Tabela 4.2: Estatísticas das medidas sobre os dados reais para o raio de alcance de 100m

Dados Reais					
Medidas	Grau m.	Núm. nós isol.	Coef. clust.	Núm. comp. con.	Dur. enl.
Média	18,05	1,35	0,76	3.12	133,91
Variância	121,54	0,64	0,02	1.13	17901,08
Desvio Padrão	11,02	0,80	0,14	1.06	133,79
Coef. de Var.	0,61	0,59	0,18	0.34	0,99
V. Mínimo	0	0	0,17	1	1
V. Máximo	44	4	1	6	600

Capítulo 5

Análise da Conectividade Através de Modelos Sintéticos de Mobilidade

NESSE capítulo será descrito como foi feita a simulação dos modelos de mobilidade apresentados no Capítulo 2, bem como serão apresentados os resultados da aplicação das métricas definidas anteriormente sobre os dados sintéticos para que seja obtida a conectividade sobre esses dados. Esses resultados são comparados com os obtidos no capítulo anterior (referentes à movimentação real).

5.1 Descrição da Simulação

Os seguintes modelos de mobilidade foram simulados: MMIG, Brownian, *Levy walk*, Smooth e Random Waypoint(RWP). Os modelos foram simulados usando o gerador de mobilidade ScenGen [45], com exceção do modelo *Levy walk*, que foi simulado utilizando um script do MATLAB disponibilizado pelos próprios autores [46]. As simulações foram executadas em uma área de 600 metros de largura por 800 metros de comprimento. Os nós são colocados em movimento de acordo com os modelos de mobilidade simulados por 1600 segundos, e os 1000 segundos iniciais foram descartados para eliminar a fase transiente da simulação. Esses parâmetros foram configurados de acordo com o experimento real. O raio de alcance de cada nó foi inicialmente configurado para $100m$.

Os parâmetros de cada modelo de mobilidade foram ajustados segundo o método proposto em [42]. Para realizar o ajuste dos parâmetros dos modelos de mobilidade, cada modelo de mobilidade foi analisado separadamente. Inicialmente foram calculadas as distribuições empíricas das componentes do movimento sobre os dados reais. Foram elas: velocidade, aceleração, ângulo de mudança de direção e tempo de pausa. Então foram escolhidos intervalos de variação para cada parâmetro do modelo de mobilidade em questão, bem como o incremento utilizado para variar os parâmetros dentro desse intervalo. Para cada modelo de mobilidade e cada variação de parâmetro específico de cada modelo, foram realizadas 100 simulações.

Após a execução de todas as simulações de um modelo, foram extraídos os valores das componentes velocidade, ângulo de mudança de direção e aceleração de cada rodada de simulação. Feito isso, a distribuição cumulativa empírica de cada componente foi obtida. Foram calculados então os valores de MSE para cada métrica comparando as distribuições obtidas dos modelos de mobilidade e as distribuições obtidas a partir dos dados reais coletados. Para cada modelo foi escolhida a configuração o que obteve o menor MSE.

Devemos observar que os valores limites de cada parâmetro de configuração de um modelo de mobilidade, bem como o incremento de variação do valor desses parâmetros devem ser cuidadosamente escolhidos, para permitir a execução de várias rodadas de simulação com o objetivo de encontrar os parâmetros mais adequados de um modelo. A Tabela 5.1, mostra o valor dos parâmetros escolhidos de cada modelo.

Tabela 5.1: Parâmetros dos modelos de mobilidade utilizados na simulação

Modelo Browniano		
<i>vel_min</i>	<i>vel_max</i>	<i>angulo</i>
0 m/s	2,29 m/s	[0, 2 Π]

Modelo MMIG		
<i>m</i>	<i>vel_max</i>	<i>base</i>
0,4	1,9 m/s	1,028

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

Modelo RWP		
<i>vel_min</i>	<i>vel_max</i>	tempo de pausa
1,52 m/s	1,58 m/s	0 sec

Modelo Smooth			
<i>vel_pref1</i>	<i>vel_pref2</i>	<i>vel_pref3</i>	<i>p_vel_pref1</i>
1,1 m/s	1,6 m/s	0,1 m/s	0,6
<i>p_vel_pref2</i>	<i>p_vel_pref3</i>	<i>prob_mud_vel</i>	<i>prob_mud_dir</i>
0,1	0,3	0,1	0,6 m/s ²

5.2 Resultados

Inicialmente é feita uma análise das métricas definidas anteriormente através das médias, que é uma forma clássica de análise[34, 47]. A análise utilizando médias deve ser feita com muito cuidado, pois a média nem sempre representa corretamente o comportamento da medida estudada. Nessa seção serão apresentados os resultados obtidos para o raio de alcance dos nós de 100m.

Podemos ver na Figura 5.1 as médias das medidas coeficiente de clusterização, número de componentes conexos e número de nós isolados para os diferentes modelos de mobilidade e dados reais. Observa-se que cada modelo de mobilidade apresenta resultados bastante distintos para as métricas. Esperávamos que houvesse uma relação entre as medidas de coeficiente de clusterização e número de componentes conexos, pois quanto maior o número de componentes conexos, menos nós estão em cada componente, o que pode tender a ter um coeficiente de clusterização alto. Devido ao tamanho da área de simulação, os nós tendem a ficar espalhados, porém poucos nós ficaram efetivamente isolados. Assim, foram formados poucos componentes conexos com muitos nós mas dentro de cada componente conexo não houve um grau alto de conectividade. Podemos observar que todos os modelos de mobilidade apresentaram um valor médio para o coeficiente de clusterização próximo ao obtido no experimento real, enquanto que para o número de componentes conexos os modelos Brownian, Levy e Smooth se apresentaram mais próximos dos dados reais. Com relação à média do número de nós isolados, o modelo que melhor se ajustou aos dados reais foi o Smooth.

Analisando a Figura 5.2 observa-se que o grau médio obtido no experimento real é muito maior que o grau médio obtido pelos modelos de mobilidade. Isso pode ser explicado pelo fato de que a área onde ocorreu o experimento existem certos caminhos que os pedestres costumam seguir, concentrando os nós perto uns dos outros, e nenhum dos modelos de mobilidade aqui estudados pode ser configurado com obstáculos. Pode-se destacar que o modelo que mais se aproximou ao valor obtido dos dados reais foi o Smooth. Por outro lado, os valores obtidos para o grau médio dos modelos MMIG e Levy Walk foram muito parecidos, da mesma forma

que os valores dos modelos Brownian e RWP também foram muito próximos.

A duração média dos enlaces que mais se aproximou do valor obtido pelos dados reais foi a do modelo Levy Walk. Podemos concluir que nesse modelo os nós devem se manter próximos uns dos outros por algum período de tempo, pois o valor do grau médio obtido foi baixo enquanto o valor da duração dos enlaces foi alto. Um comportamento similar foi obtido pelo RWP e MMIG, enquanto que os modelos Brownian e Smooth apresentaram baixos valores para a duração dos enlaces.

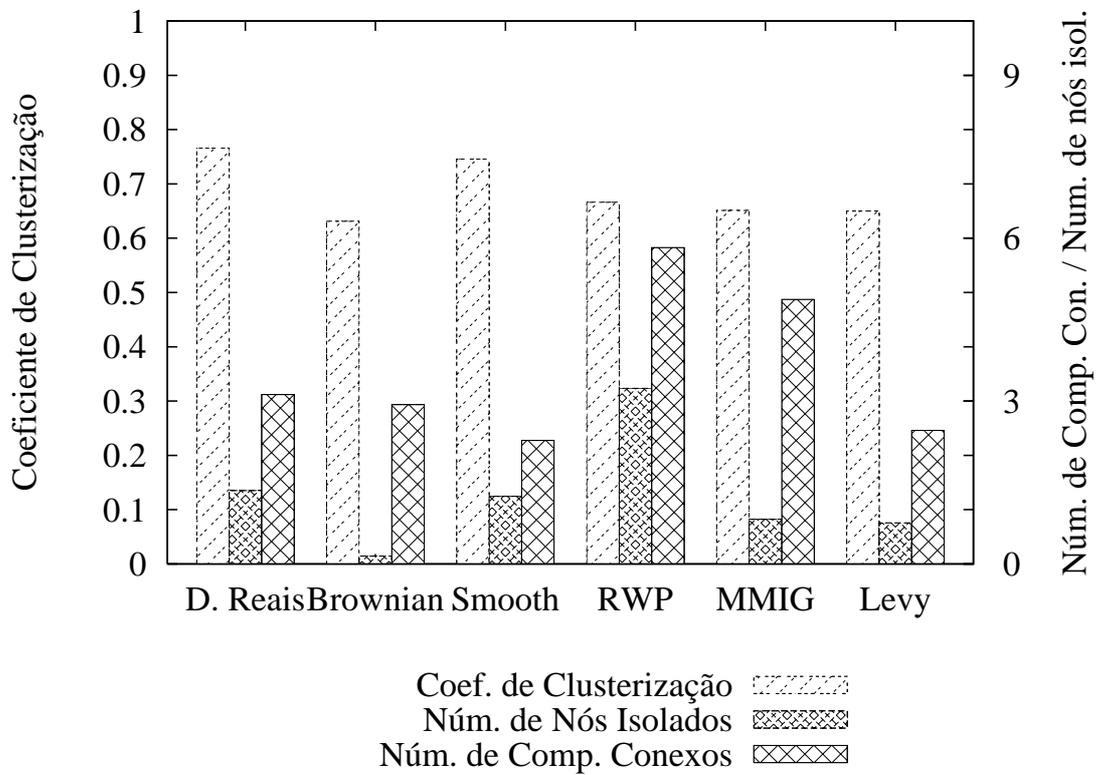


Figura 5.1: Estatísticas de comp. conexos para os diferentes modelos e dados reais para o raio de alcance de 100m

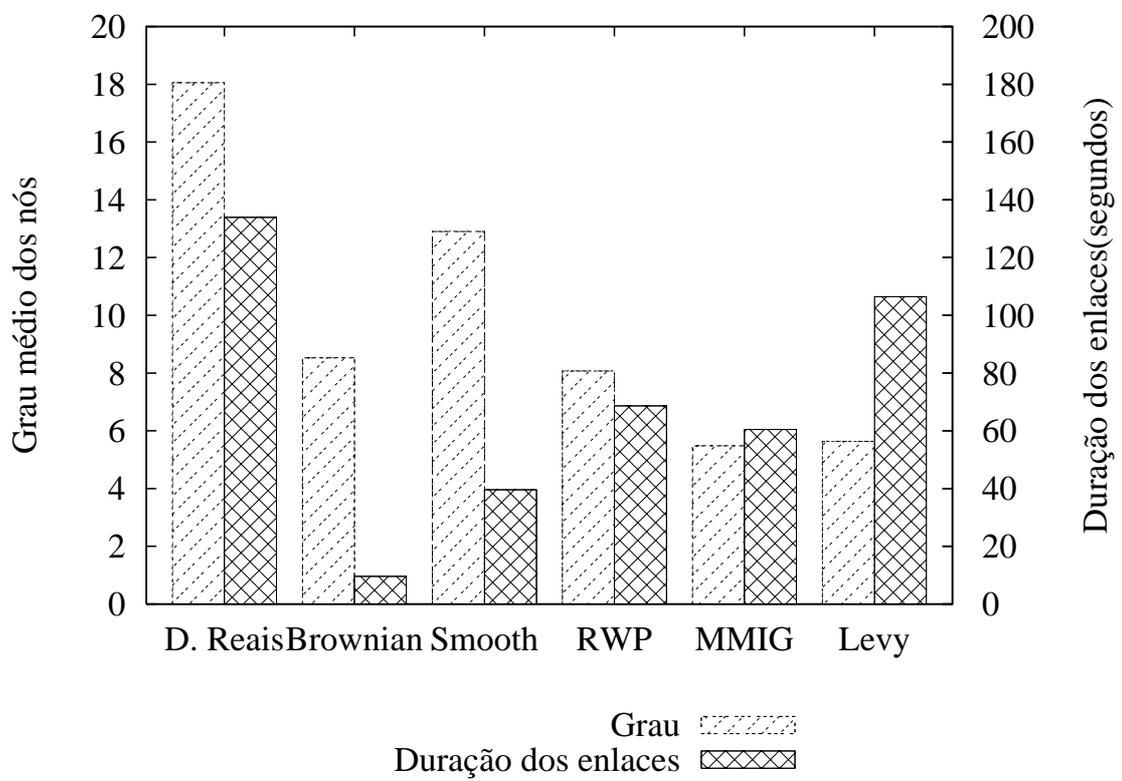


Figura 5.2: Estatísticas de enlaces para os diferentes modelos e dados reais para o raio de alcance de 100m

As médias possibilitam uma visão imediata do efeito dos modelos de mobilidade no grau dos nós e duração dos enlaces, porém podemos ter uma visão mais detalhada observando as suas respectivas distribuições cumulativas empíricas.

Comparando as distribuições cumulativas do grau dos nós (ver Figura 5.3) observamos que os modelos de mobilidade são bastante distintos dos dados reais. Para os dados reais, 50% dos nós apresenta grau até 18, enquanto que para os dados sintéticos, mais de 80% dos nós apresenta grau até 18. Aplicando-se o método de cálculo do MSE para verificar qual a função de distribuição que se ajusta melhor aos dados reais obtivemos a distribuição Normal (ver Figura 4.6). Entre os modelos de mobilidade, o Smooth se ajustou melhor aos dados reais. Conforme podemos observar na Figura, os resultados obtidos na análise das médias se confirma. O comportamento da conectividade obtida através dos modelos MMIG e Levy Walk são muito próximos, e o comportamento da conectividade obtida através dos modelos Brownian e RWP também são similares.

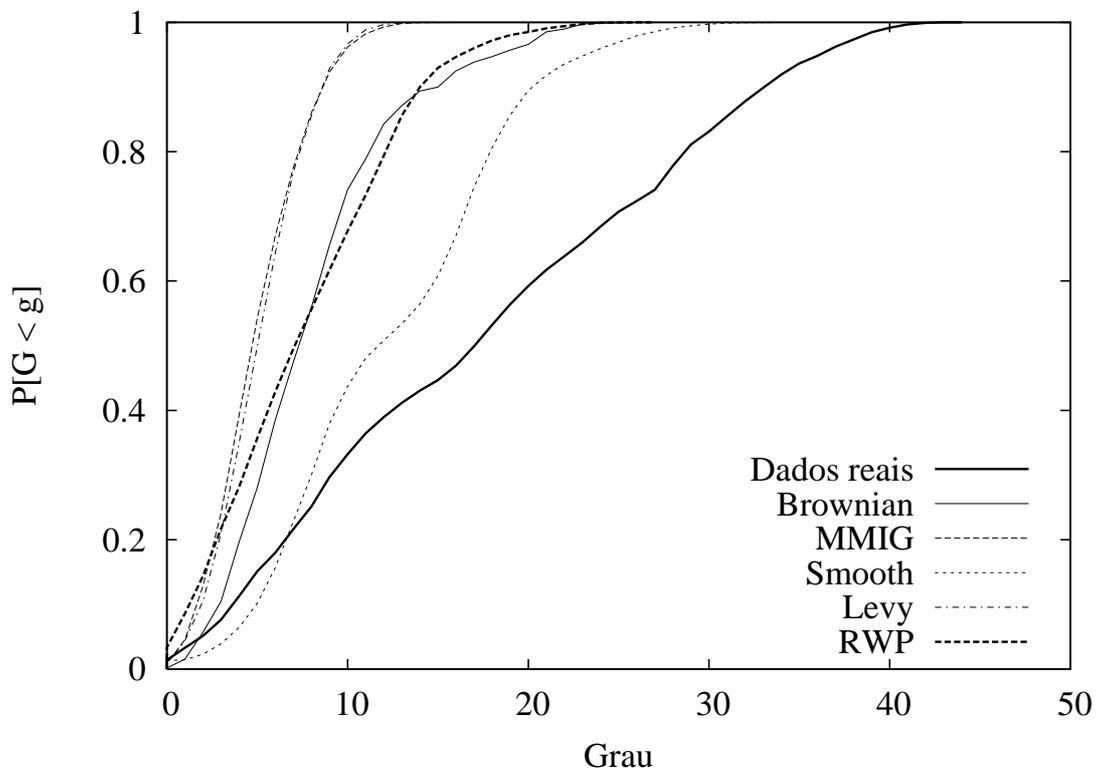


Figura 5.3: Distribuições de probabilidade cumulativa do grau para os dados reais e modelos sintéticos para o raio de alcance de 100m

Através da Figura 5.4, podemos verificar que para a métrica número de nós isolados houve uma diferença enorme entre os dados reais e os sintéticos. E a métrica obtida através dos modelos MMIG, Levy Walk e Smooth apresentaram comportamento similar. Já o número de nós isolados dos modelos Brownian e RWP apresentaram comportamento totalmente diferente quando comparado tanto aos dos dados reais quanto aos dos outros modelos de mobilidade.

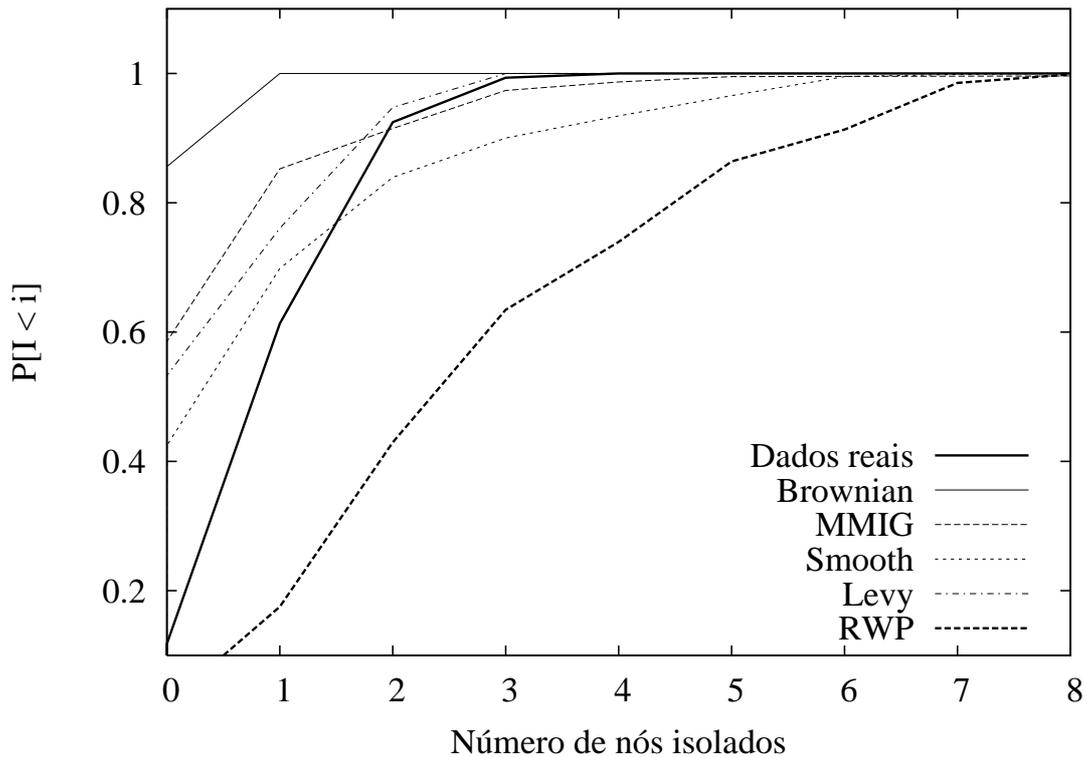


Figura 5.4: Distribuições de probabilidade cumulativa do número de nós isolados para os dados reais e modelos sintéticos para o raio de alcance de 100m

Na Figura 5.5 podemos ver a distribuição cumulativa do coeficiente de clusterização. Através da análise das médias para essa métrica pode-se observar que os valores médios pra todos os modelos de mobilidade são muito próximos uns dos outros (ver Figura 5.1). Analisando a Figura 5.5, verifica-se que o coeficiente de clusterização através do modelo Smooth apresentou um comportamento muito semelhante ao comportamento dos dados reais, e que os outros modelos tem o comportamento muito parecido entre si.

A distribuição cumulativa do número de componentes conexas para os dados re-

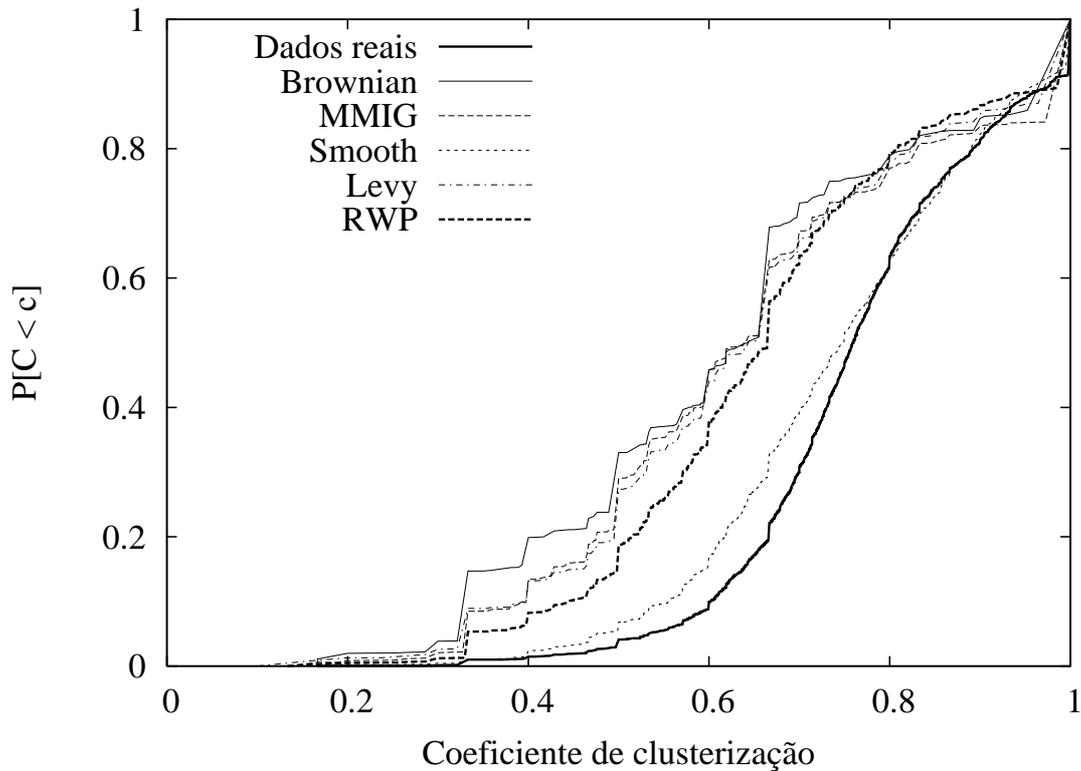


Figura 5.5: Distribuições de probabilidade cumulativa do coeficiente de clusterização para mobilidade real e sintética para o raio de alcance de 100m

ais e sintéticos pode ser vista na Figura 5.6. Observa-se claramente que o número de componentes conexas do modelo Brownian teve um comportamento muito próximo ao real. Esse resultado é interessante, pois o modelo Brownian escolhe a direção do movimento aleatoriamente, e essa direção do movimento é responsável pelo espalhamento dos nós na área de simulação e a conseqüente formação de componentes conexas. Segundo a análise das médias (ver Figura 5.1), o número de componentes conexas dos modelos Brownian, Levy Walk e Smooth apresentaram comportamento muito parecido, porém observando a Figura 5.6 verificamos que essa métrica dos modelos não estão muito próximos, e o modelo Brownian se destaca por estar muito perto da distribuição real.

Com exceção do modelo Levy Walk, a distribuição cumulativa empírica da duração dos enlaces obtida pelos dados reais é bastante diferente da obtida pelos modelos de mobilidade (ver Figura 5.7). Uma característica observada nos dados reais foi que cerca de 80% dos enlaces duram até 200 segundos. Essa característica pode ser

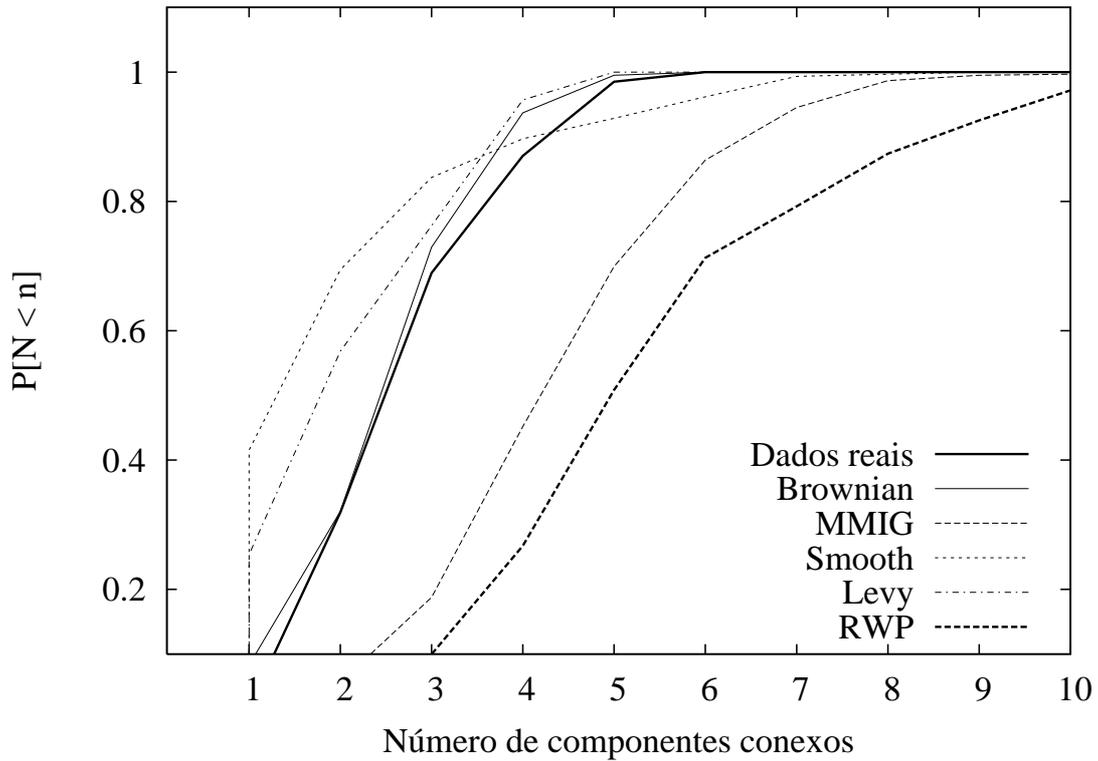


Figura 5.6: Distribuições de probabilidade cumulativa do número de componentes conexos para mobilidade real e sintética para o raio de alcance de 100m

observada no modelo Levy Walk, mas nos outros modelos de mobilidade a mesma porcentagem durou até 70 segundos, exceto no modelo Brownian, que teve um comportamento totalmente distinto tanto do comportamento real quanto dos outros modelos, onde 98% dos enlaces duram até 10 segundos.

Os resultados obtidos através do cálculo do MSE entre os dados reais e cada modelo de mobilidade podem ser vistos na Tabela 5.2. As células grifadas na Tabela são os menores valores de MSE obtidos para cada métrica. Quanto menor o valor do MSE, mais próximo estão as duas distribuições cumulativas (a obtida através dos dados reais e a obtida através dos modelos de mobilidade).

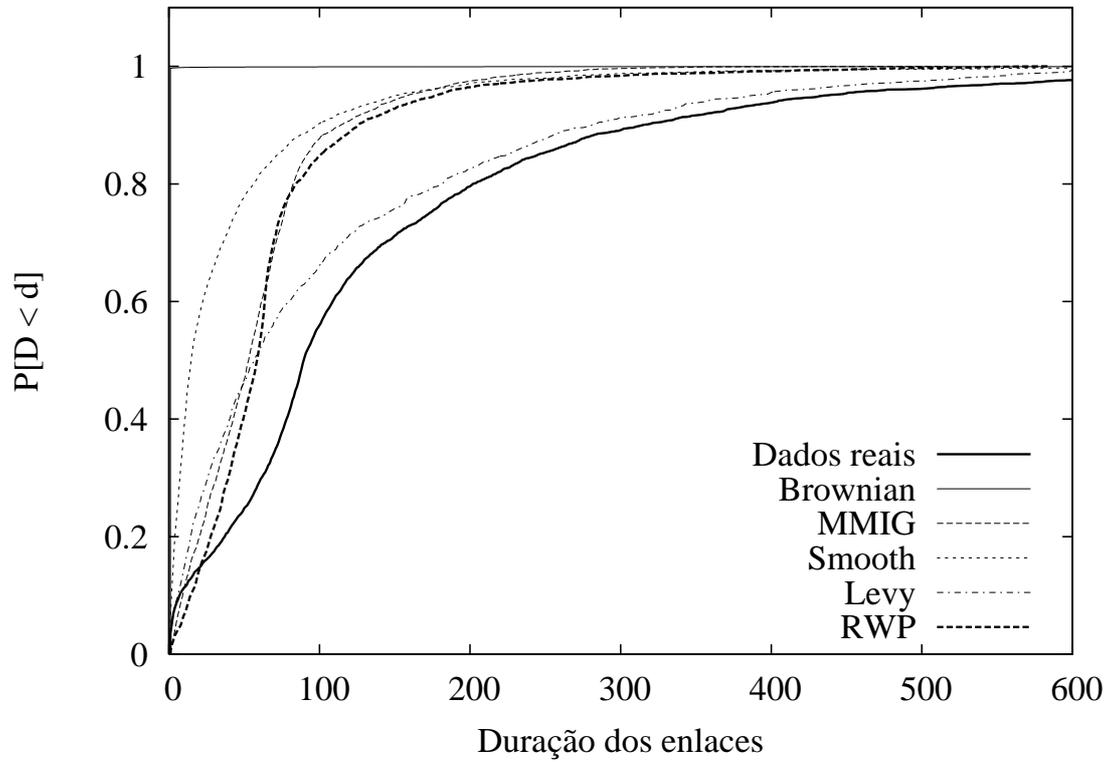


Figura 5.7: Distribuições de probabilidade cumulativa da duração dos enlaces para mobilidade real e sintética para o raio de alcance de 100m

Tabela 5.2: Valores de MSE obtidos comparando os modelos de mobilidade e os dados reais para cada métrica da conectividade para o raio de alcance de 100m

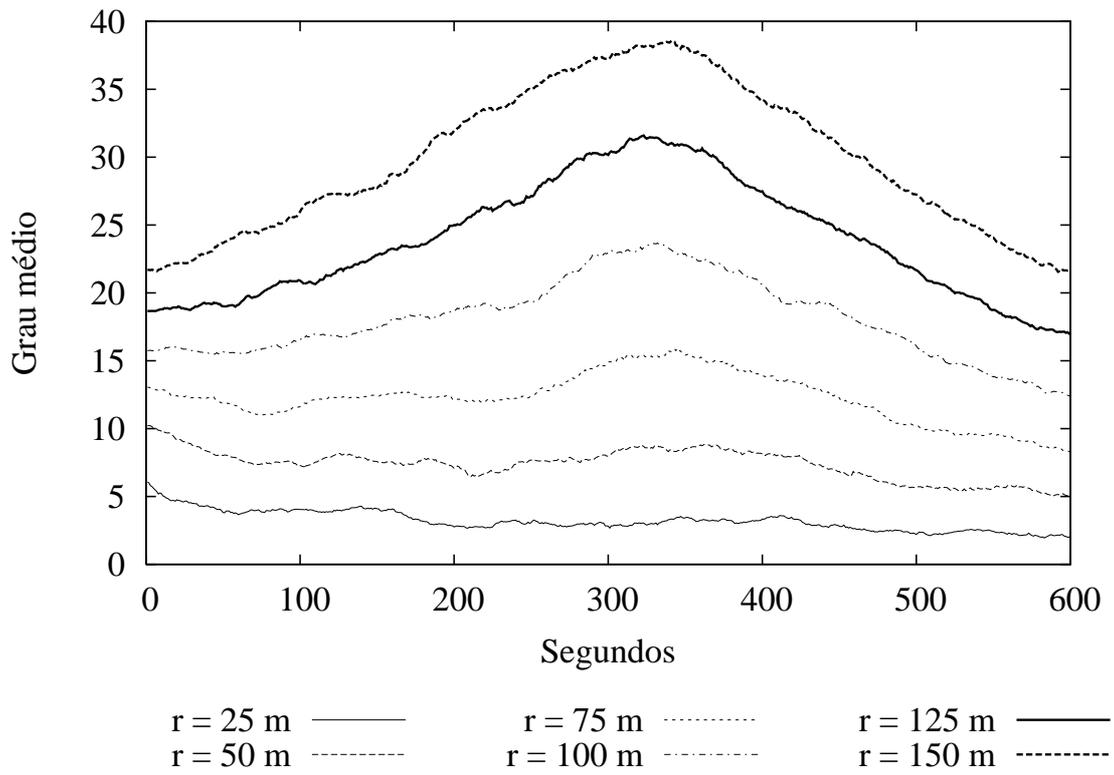
Métrica/Distribuição	Brownian	Levy Walk	MMIG	Smooth	RWP
Grau	0,082453	0,148023	0,151439	0,028106	0,085403
Núm. nós isol.	0,197313	0,067582	0,093840	0,038474	0,102611
Coef. de clust.	0,059754	0,050601	0,052946	0,002834	0,045673
Núm. comp. con.	0,001883	0,036482	0,113121	0,085087	0,174082
Dur. dos enlaces	0,074403	0,015217	0,054292	0,113044	0,047445

5.3 Variação do raio de alcance

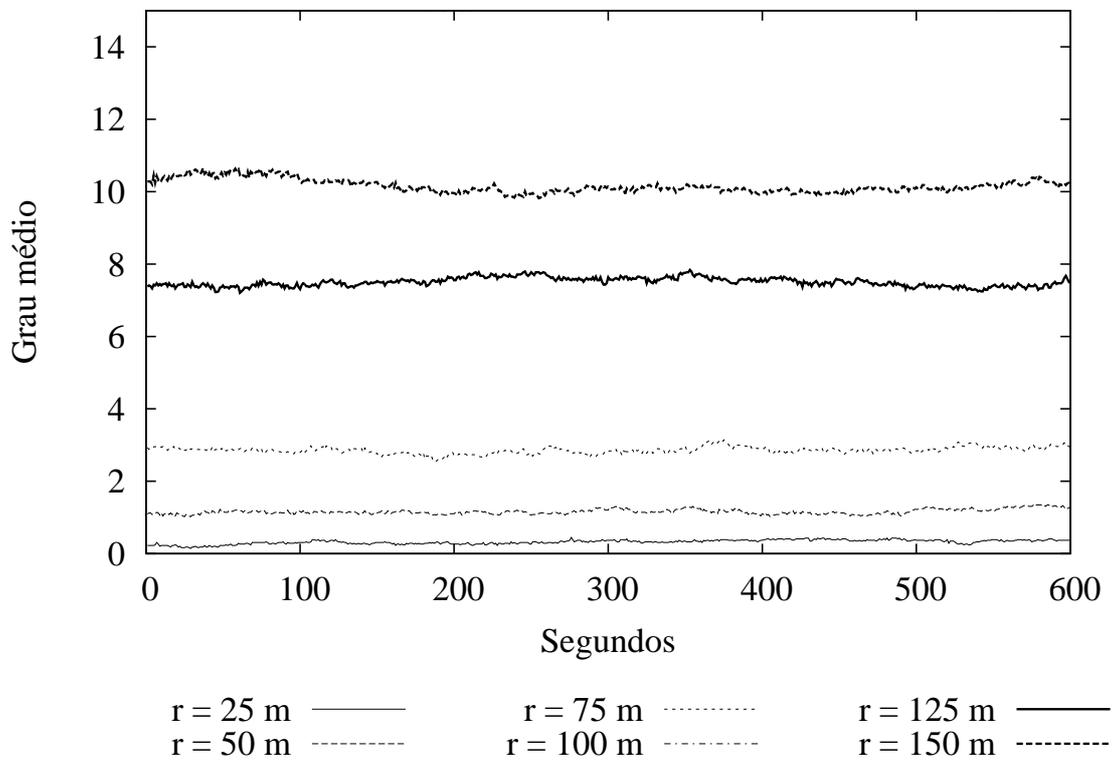
Para complementar esse estudo, foram realizadas simulações dos modelos de mobilidade variando o raio de alcance dos nós. Foram simulados os modelos para os mesmos valores de raio utilizados no estudo dos dados reais no capítulo anterior deste trabalho. São eles: 25, 50, 75, 100, 125 e 150 metros.

O comportamento dos dados reais sob o aspecto do grau médio a cada segundo não pôde ser reproduzido por nenhum modelo de mobilidade, como podemos observar nas Figuras 5.8, 5.9 e 5.10. Para os raios de alcance maiores, os dados reais apresentaram um comportamento interessante, pois no início da simulação apresentou valores mais baixos para o grau médio, no meio da simulação esses valores praticamente dobraram e no final diminuíram ao patamar inicial. Como foi explicado no capítulo anterior, isso se deve às características da região onde a coleta de dados ocorreu. Um comportamento similar pode ser observado na Figura 5.10, no modelo RWP.

Para valores mais baixos do raio de alcance, os dados reais mantiveram-se estáveis em torno do valor 4. Os modelos de mobilidade também apresentaram um comportamento mais estável, mas com valores muito mais baixos. Os modelos conseguiram equiparar-se aos dados reais apenas com o raio de 75 metros. Observou-se também que os modelos apresentaram resultados similares para os raios de 25, 50 e 75, e entre 100, 125 e 150, e entre esses dois grupos uma diferença grande de comportamento.

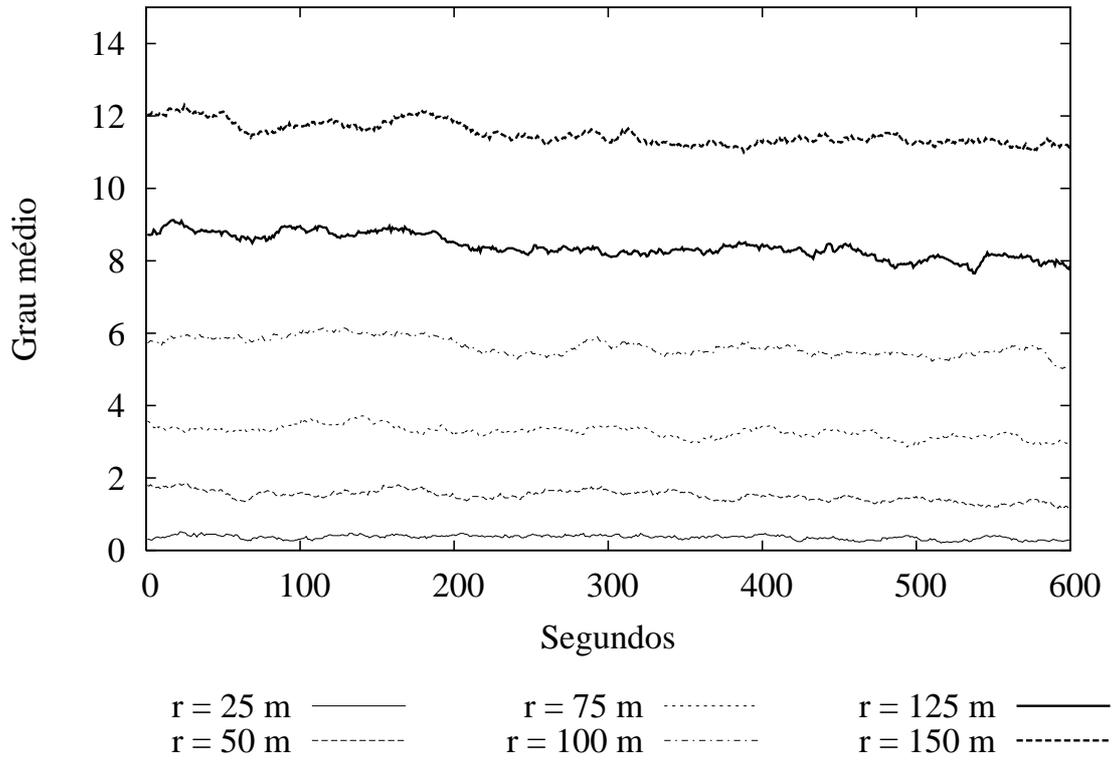


(a) Dados reais

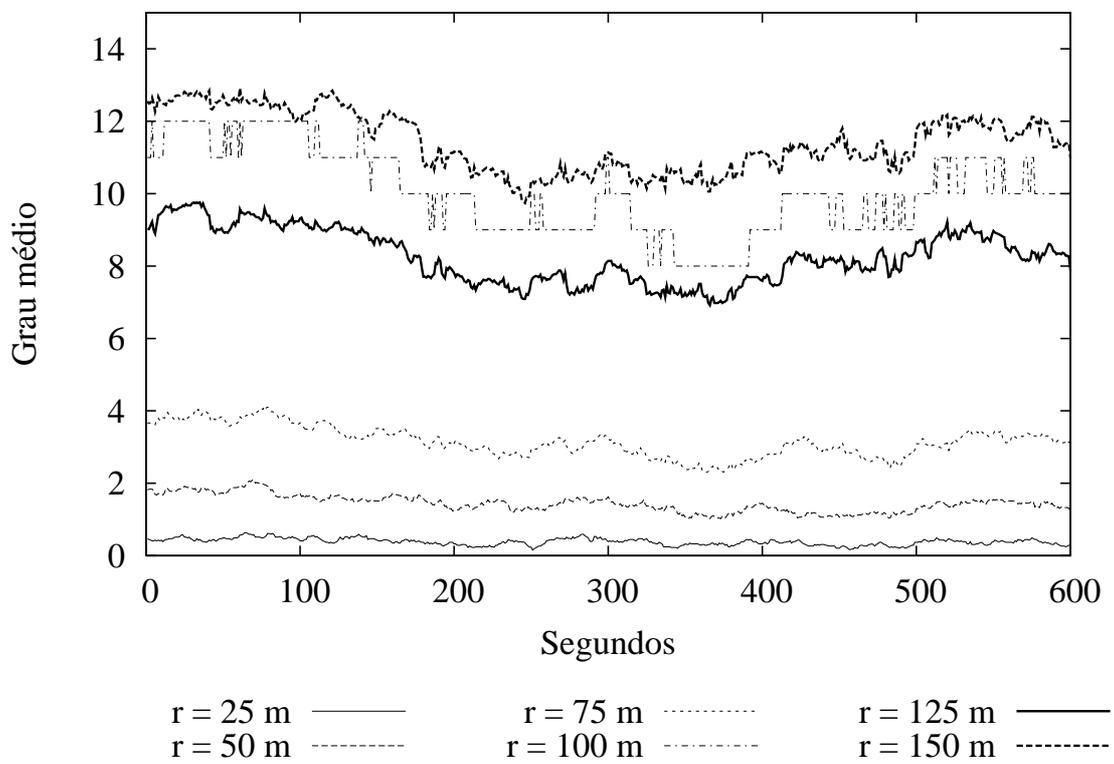


(b) Brownian

Figura 5.8: Grau médio dos nós a cada segundo para os dados reais e o modelo Brownian parametrizado em r (raio de alcance dos nós)

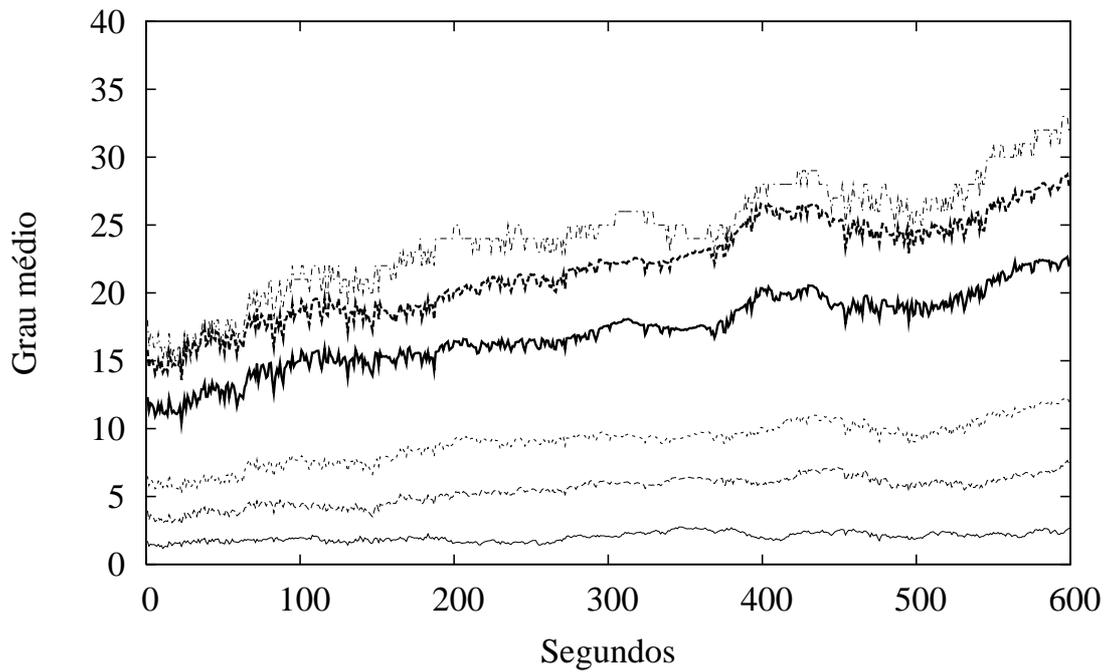


(a) Levy Walk



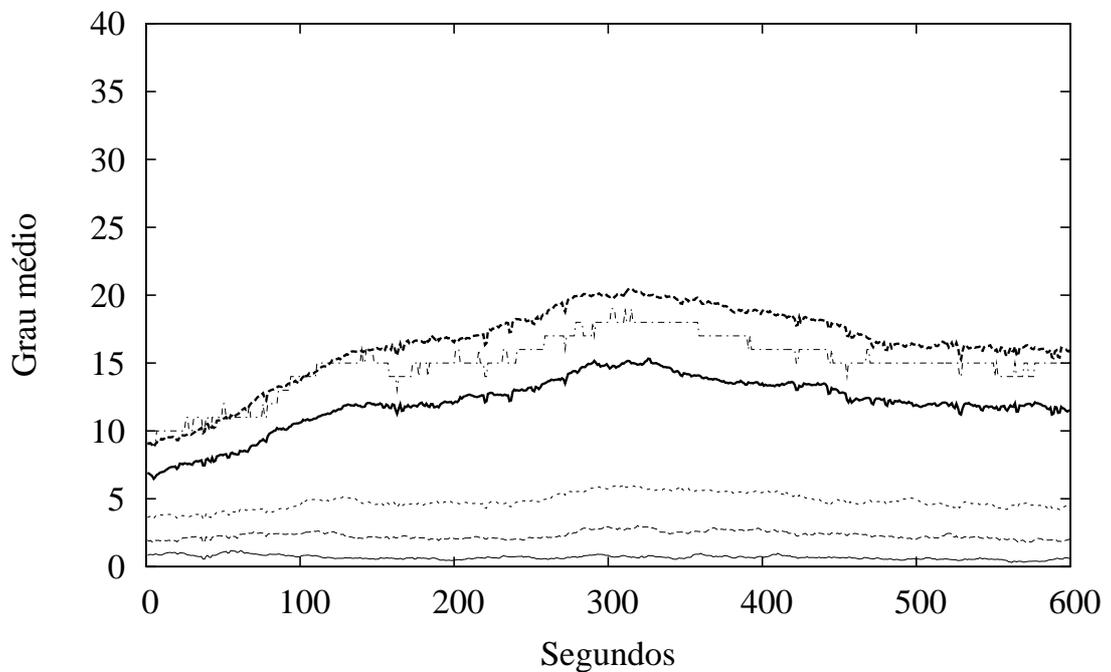
(b) MMIG

Figura 5.9: Grau médio dos nós a cada segundo para os modelos Levy e MMIG parametrizado em r (raio de alcance dos nós)



$r = 25 \text{ m}$ ——— $r = 75 \text{ m}$ $r = 125 \text{ m}$ ———
 $r = 50 \text{ m}$ - - - - - $r = 100 \text{ m}$ - - - - - $r = 150 \text{ m}$ - - - - -

(a) Smooth



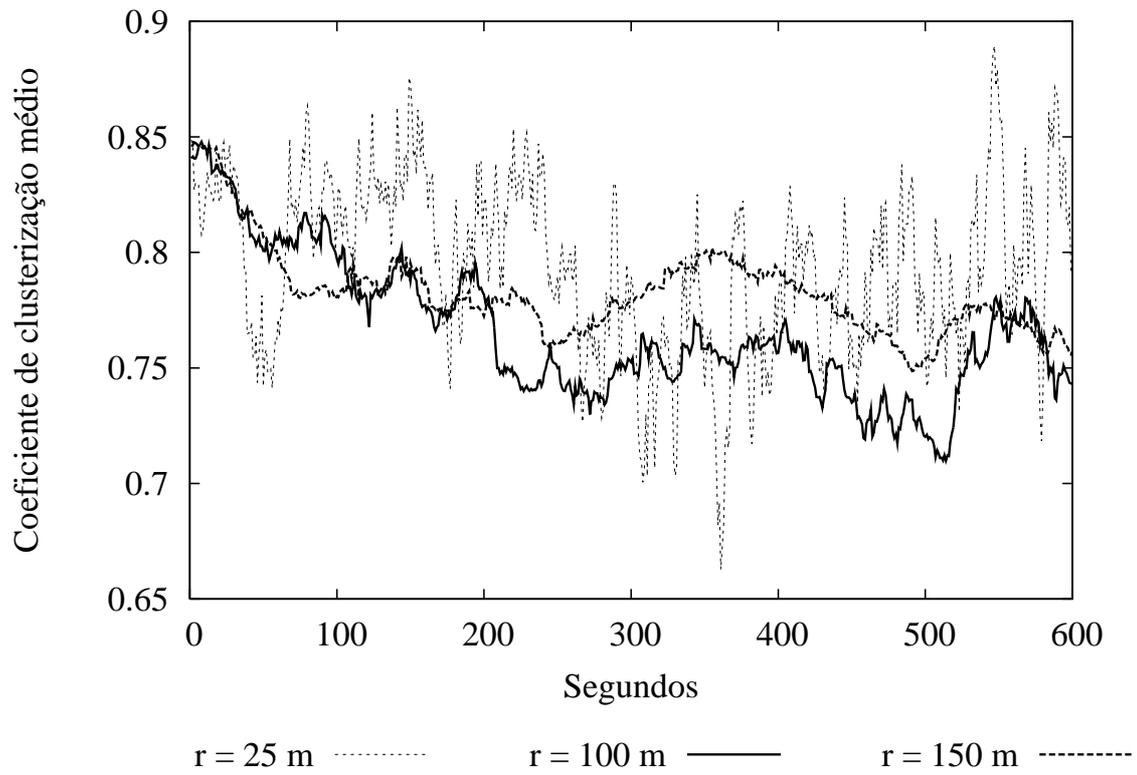
$r = 25 \text{ m}$ ——— $r = 75 \text{ m}$ $r = 125 \text{ m}$ ———
 $r = 50 \text{ m}$ - - - - - $r = 100 \text{ m}$ - - - - - $r = 150 \text{ m}$ - - - - -

(b) RWP

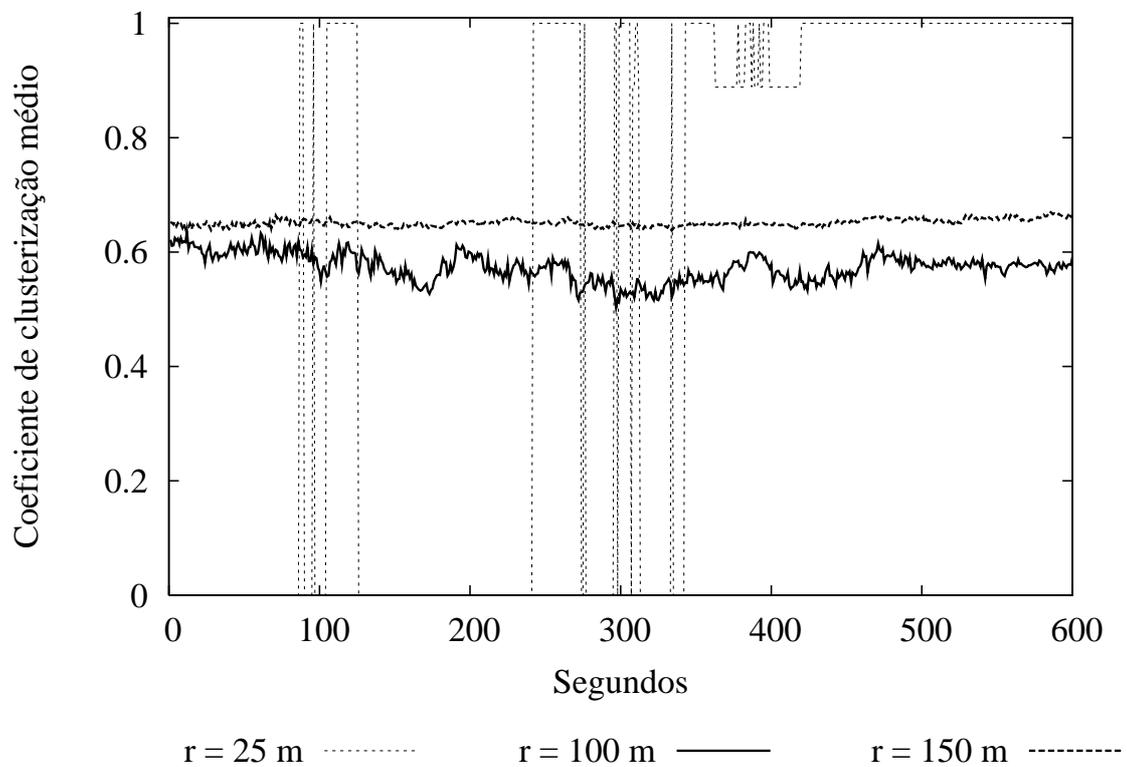
Figura 5.10: Grau médio dos nós a cada segundo para os modelos Smooth e RWP parametrizado em r (raio de alcance dos nós)

Com relação ao coeficiente de clusterização, é importante observar que uma condição necessária para que o mesmo em um determinado instante para um nó possa ser calculado, é que esse nó possua pelo menos dois vizinhos. Isso porque o coeficiente de clusterização é usado em um grafo para medir a conectividade dos dispositivos adjacentes a determinado nó. Quando o nó possui menos de dois vizinhos, o valor para o coeficiente de clusterização é zero. Como podemos observar nas Figuras 5.11, 5.12, 5.13, quando o raio de alcance foi configurado para 25m todos os modelos (exceto o modelo Smooth) apresentaram um comportamento similar. Como o raio de alcance é muito pequeno, durante alguns segundos os modelos tiveram o coeficiente de clusterização zero (porque não tinham pelo menos dois vizinhos). E logo em seguida apresentaram valor 1, porque entraram dentro do raio de alcance de outros nós e como são poucos vizinhos, todos os vizinhos se alcançam entre si.

Para os outros valores do raio de alcance, os modelos apresentaram um comportamento que variou muito pouco e cujos valores foram muito próximos entre si e aos dados reais. Por isso, assim como na análise da mobilidade real apresentada no Capítulo anterior, omitimos as curvas referentes aos raios 50, 75 e 125, para facilitar a visualização dos resultados.

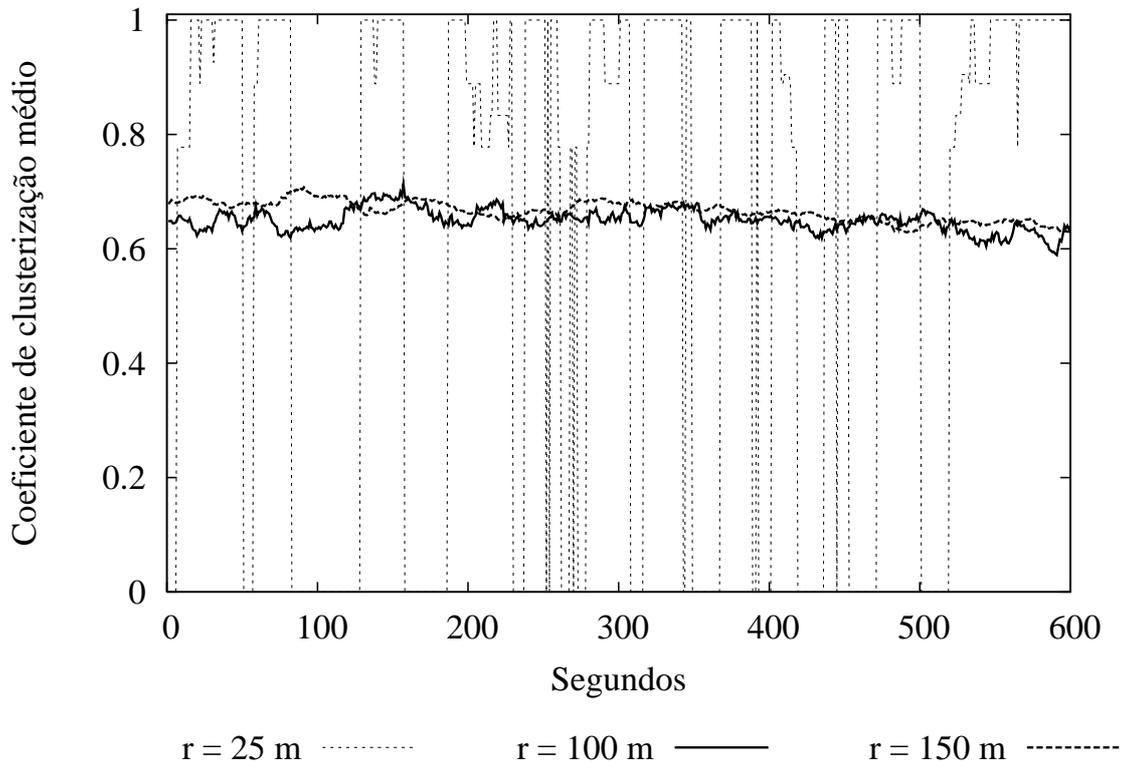


(a) Dados reais

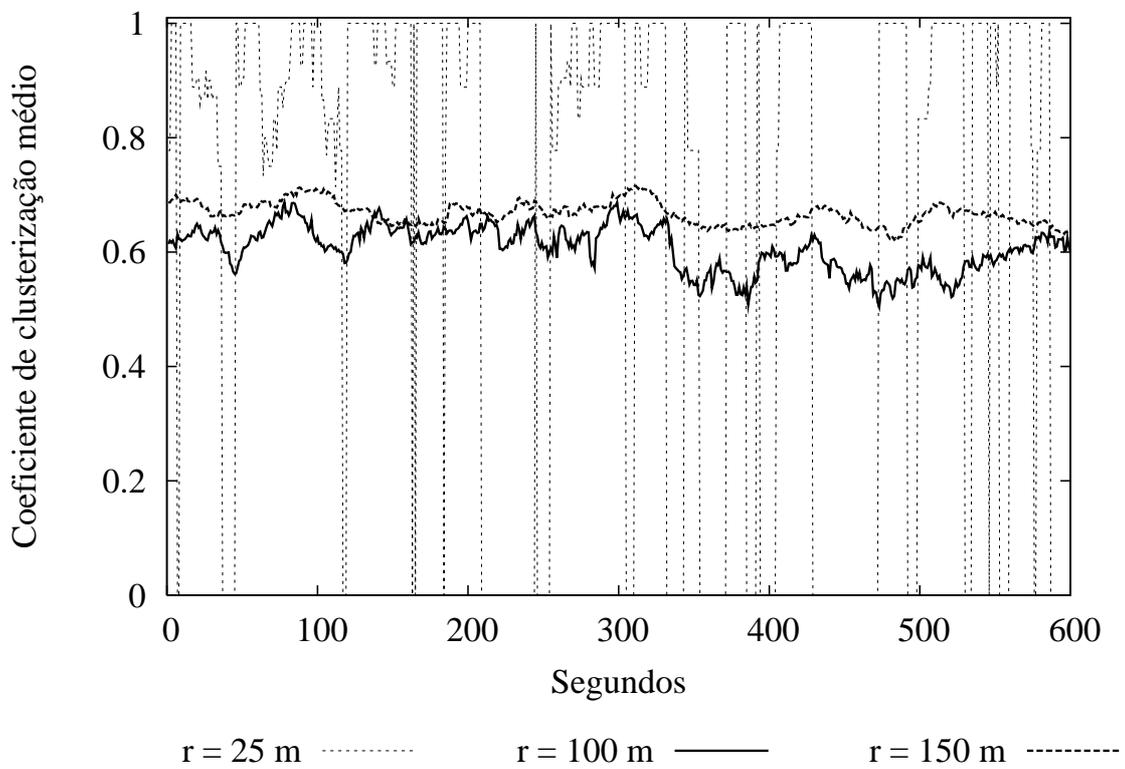


(b) Brownian

Figura 5.11: Coeficiente de clusterização médio dos nós a cada segundo para os dados reais e o modelo Brownian parametrizado em r (raio de alcance dos nós)

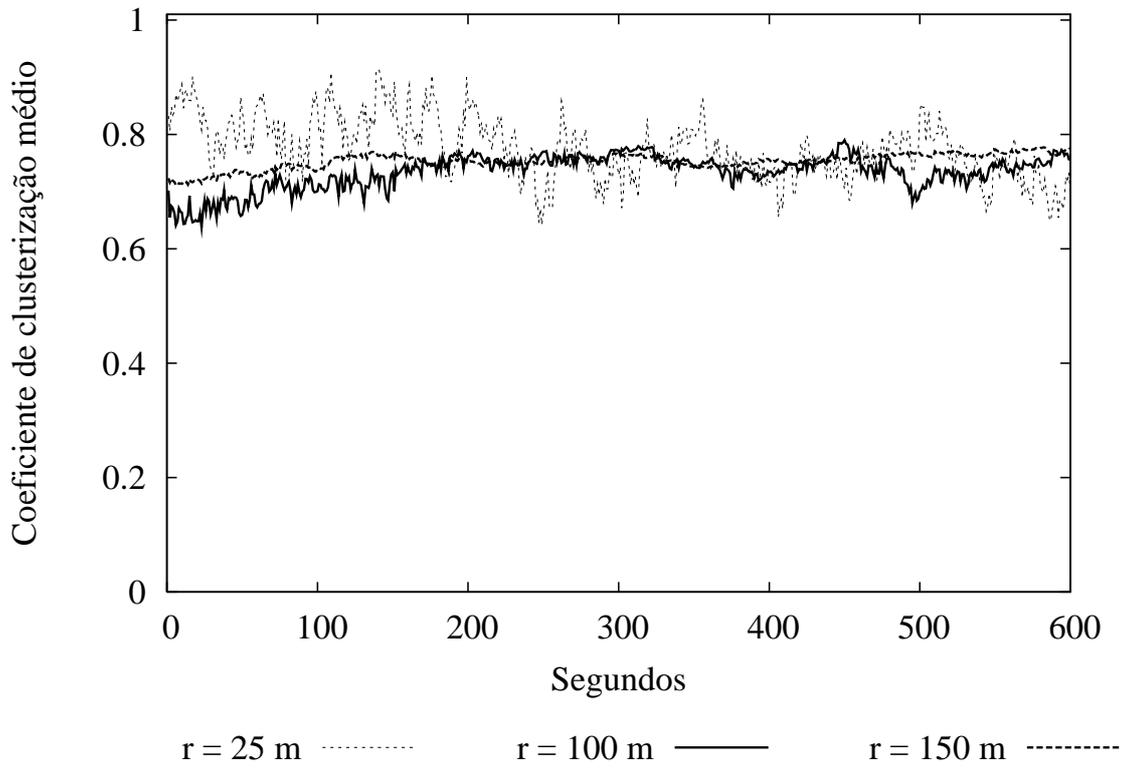


(a) Levy Walk

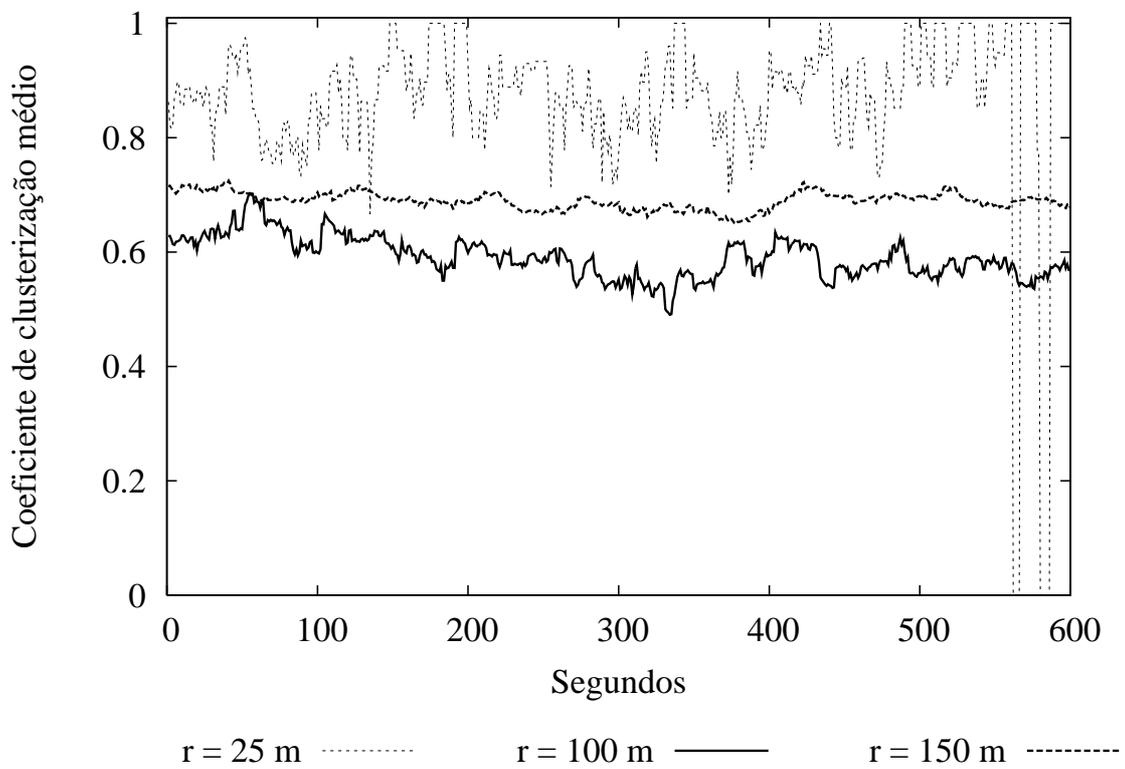


(b) MMIG

Figura 5.12: Coeficiente de clusterização médio dos nós a cada segundo para os modelos Ley e MMIG parametrizado em r (raio de alcance dos nós)



(a) Smooth



(b) RWP

Figura 5.13: Coeficiente de clusterização médio dos nós a cada segundo para os modelos Smooth e RWP parametrizado em r (raio de alcance dos nós)

Através dos resultados obtidos neste capítulo, podemos concluir que os modelos sintéticos apresentam uma conectividade muito diferente da real. Os resultados mostram também que a análise da média não representa bem o comportamento dos modelos, pois foram obtidos resultados diferentes quando analisamos as suas distribuições cumulativas. A análise das distribuições cumulativas permite também um detalhamento dos dados muito maior que a análise da médias.

Os resultados obtidos são específicos para esse cenário, e não devem ser generalizados. Para isso, é necessário a análise da conectividade em outros cenários.

No próximo capítulo serão apresentadas as conclusões do trabalho, e perspectivas de trabalhos futuros.

Capítulo 6

Conclusão e Trabalhos Futuros

ESTE capítulo apresenta as principais contribuições alcançadas durante a pesquisa, e extrai as conclusões e observações relevantes. Ao final desse capítulo são feitas algumas sugestões de trabalhos futuros.

6.1 Conclusão

As redes locais sem fio já são uma realidade em vários ambientes de redes, principalmente nos que requerem mobilidade dos usuários. As aplicações são as mais diversas e abrangem desde aplicações médicas, por exemplo, visita a vários pacientes com sistema portátil de monitoramento, até ambientes de escritório ou de fábrica e cenários militares. As aplicações de redes sem fio Ad Hoc devem continuar crescendo devido às vantagens de rapidez na implementação e reconfiguração, robustez e baixo custo. Além disso, a mobilidade oferece uma liberdade muito grande aos usuários, que agora não precisam ficar parados no mesmo lugar. Por outro lado essa mobilidade afeta diretamente o desempenho da rede.

Um dos maiores desafios em redes móveis é desenvolver algoritmos eficientes para comunicações utilizando múltiplos saltos como nas MANETs e nas redes de sensores, devido à mobilidade dos nós que formam estas redes. E nem sempre é possível utilizar dados reais de movimentação para a avaliação de desempenho desses algoritmos. Por isso, é necessário que os modelos utilizados para representar a mobilidade das estações sejam cuidadosamente escolhidos. De acordo com o Capítulo 2, existem na literatura diversos modelos de mobilidade dedicados à representação da movimentação de usuários em MANETs.

As seguintes métricas foram definidas para analisar a conectividade: grau do nó, número de nós isolados, número de componentes conexas, coeficiente de clusterização e duração dos enlaces. Os passos para estudo da conectividade também foram definidos, e foi realizado um estudo de caso utilizando mobilidade real onde foram extraídas as métricas de conectividade propostas pela metodologia. As distribuições empíricas das métricas foram comparadas com distribuições de probabilidade conhecidas e com as distribuições obtidas usando mobilidade sintética (modelos Brownian, Levy Walk, MMIG, Smooth e RWP).

A análise das propriedades topológicas em MANETs mostrou que existem diferenças enormes entre a conectividade obtida da mobilidade real e a obtida da mobilidade sintética, e evidencia a necessidade de desenvolver modelos de mobili-

dade mais realistas, ou utilizar mobilidade real no estudo das MANETs. Para o cenário estudado, nenhuma das métricas extraídas dos modelos de mobilidade se aproximou das métricas extraídas dos dados reais. Foi mostrado que mesmo quando utiliza-se um modelo de mobilidade considerado realista como o Levy Walk, a conectividade da rede não é adequada ou similar à conectividade obtida utilizando mobilidade real.

Dentre as métricas estudadas, a conectividade gerada pelo modelo Smooth apresentou comportamento mais próximo a conectividade da mobilidade real para as métricas grau, número de nós isolados e coeficiente de clusterização. O modelo Brownian foi o modelo mais próximo segundo a métrica número de componentes conexas e o modelo Levy Walk segundo a duração dos enlaces. A escolha do modelo mais próximo dentre esses três deve ser feita de acordo com a aplicação a ser utilizada. Pode ser interessante usar o modelo Smooth em situações onde é importante que o grau do nó seja compatível com o do cenário real, como pode ser interessante usar o modelo Levy Walk em outra situação onde seja mais importante a duração dos enlaces.

É importante enfatizar que esses resultados obtidos são pertinentes para o cenário em questão, e não devem ser generalizados. Para cada cenário que se deseje estudar deve ser realizado um estudo semelhante.

Para que conclusões mais abrangentes possam ser elaboradas, outros estudos de caso ou cenários devem ser analisados. A conectividade em uma MANET (principalmente quando a mobilidade humana é utilizada) apresenta aspectos muito complexos que devem ser investigados, por exemplo a dependência do local onde está sendo feito o estudo, do dia, horário e estação do ano, do tempo, e enfim, do próprio ser humano participando da pesquisa.

Como visto anteriormente, esse trabalho motiva uma investigação de outros aspectos relacionados à conectividade em MANETs. Na seção a seguir alguns trabalhos futuros são destacados para dar continuidade à pesquisa.

6.2 Trabalhos Futuros

Assim como nesse trabalho algumas métricas para o estudo da conectividade foram definidas, o estudo e análise de outras métricas que caracterizem a topologia de redes pode ser realizado. Por exemplo, para um cenário onde se deseja ter informações mais detalhadas sobre as componentes conexas, outras métricas podem ser interessantes, como: tamanho médio da componente conexa, tamanho da maior componente conexa e conectividade na componente conexa.

Uma continuação do trabalho aqui proposto é a construção de uma ferramenta para geração automática de traces, que teria como parâmetro de entrada traces reais de movimentação e como saída um conjunto de traces com propriedades de conectividade similares. Isso pode ser feito da seguinte maneira. As distribuições das métricas definidas nesse trabalho podem ser extraídas de medidas de traces reais. Os traces reais podem ser processados por um analisador de traces para gerar os parâmetros descrevendo a conectividade dos usuários requeridos pela ferramenta geradora de traces. Esses são os coeficientes das curvas usados para aproximar as distribuições do grau dos nós, número de nós isolados, número de componentes conexas, coeficiente de clusterização e duração dos enlaces. A partir desses parâmetros, a ferramenta geraria uma mobilidade sintética cujas características seriam similares às dos traces reais. Dessa forma, teríamos uma alternativa à mobilidade gerada por modelos de mobilidade no estudo de redes sem fio.

Por outro lado, o conhecimento das medidas de conectividade sobre dados reais segundo a metodologia proposta pode ser utilizado para o desenvolvimento de novos modelos de mobilidade mais realísticos. Esse é um trabalho interessante, pois como foi verificado no presente trabalho, os modelos de mobilidade atualmente utilizados pela comunidade científica não apresentam características semelhantes às características da movimentação real capturada no parque da Quinta da Boa Vista.

Bibliografia

- [1] GOMES, R. L., AND MOTA, R. R. A quinta da boa vista. Secretaria Especial de Turismo, Rio de Janeiro, 2007.
- [2] CAMPOS, C. A. V., BEZERRA, R. L., AZEVEDO, T. S., AND DE MORAES, L. F. M. An analysis of human mobility using real traces. In *2009 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC 2009)* (Budapest, Hungary, 2009), IEEE Computer Society.
- [3] KURKOWSKI, S., CAMP, T., AND COLAGROSSO, M. Manet simulation studies: the incredibles. *SIGMOBILE Mob. Comput. Commun. Rev.* 9, 4 (October 2005), 50–61.
- [4] ANDEL, T. R., AND YASINSAC, A. On the credibility of manet simulations. *IEEE Computer* 39, 7 (2006), 48–54.
- [5] HEIDEMANN, J., MILLS, K., AND KUMAR, S. Expanding confidence in network simulation. *IEEE Network Magazine* 15, 5 (Sept./Oct. 2001), 58–63.
- [6] YOON, J., LIU, M., AND NOBLE, B. Random waypoint considered harmful. In *IEEE INFOCOM'03* (2003), pp. 1312–1321.
- [7] YOON, J., LIU, M., AND NOBLE, B. A general framework to construct stationary mobility models for the simulation of mobile networks. *IEEE Transactions on Mobile Computing* 5, 7 (2006), 860–871.
- [8] BETTSTETTER, C. Mobility modeling in wireless networks: Categorization, smooth movement, and border effects. *ACM Mobile Computing and Communications Review* 5, 3 (2001), 55–66.

- [9] BETTSTETTER, C. On the connectivity of wireless multihop networks with homogeneous and inhomogeneous range assignment.
- [10] NAVIDI, W., AND CAMP, T. Stationary Distributions for the Random Waypoint Mobility Model. *IEEE Transactions on Mobile Computing* 3, 1 (2004), 99–108.
- [11] ROYER, E. M., MELLIAR-SMITH, P. M., AND MOSER, L. E. An analysis of the optimum node density for ad hoc mobile networks. In *In Proceedings of the IEEE International Conference on Communications* (2001), pp. 857–861.
- [12] BAI, F., SADAGOPAN, N., AND HELMY, A. The important framework for analyzing the impact of mobility on performance of routing protocols for adhoc networks. *Ad Hoc Networks* 1, 4 (2003), 383–403.
- [13] JAIN, R. *The Art of Computer Systems Performance Analysis*. John Wiley and Sons, New York, NY, USA, 1991.
- [14] BOUDEC, J. L., AND VOJNOVI, M. Perfect simulation and stationarity of a class of mobility models, 2004.
- [15] ANDEL, T. R., AND YASINAC, A. On the credibility of manet simulations. *Computer* 39, 7 (2006), 48–54.
- [16] KIESS, W., AND MAUVE, M. A survey on real-world implementations of mobile ad-hoc networks. *Ad Hoc Networks* 5, 3 (2007), 324–339.
- [17] CHAINTREAU, A., HUI, P., CROWCROFT, J., DIOT, C., GASS, R., AND SCOTT, J. Pocket switched networks: Real-world mobility and its consequences for opportunistic forwarding. *University of Cambridge Computer Laboratory, Tech. Rep. UCAM-CL-TR-617, Feb* (2005).
- [18] HUI, P., CHAINTREAU, A., SCOTT, J., GASS, R., CROWCROFT, J., AND DIOT, C. Pocket switched networks and human mobility in conference environments. In *Proceedings of the 2005 ACM SIGCOMM workshop on Delay-tolerant networking* (Philadelphia, PA, USA, August 2005), pp. 244–251.

- [19] CRAWDAD - Community Resource for Archiving Wireless Data At Dartmouth. URL <http://crawdad.cs.dartmouth.edu/>. Último acesso em 16/01/2009.
- [20] TRIVIÑO-CABRERA, A., DE-LA NAVA, J. G., CASILARI, E., AND GONZÁLEZ-CAÑETE, F. J. An analytical model to estimate path duration in manets. In *ACM MSWiM'06* (Terromolinos, Spain, 2006), pp. 183–186.
- [21] LIU, J., YUAN, Y., NICOL, D. M., GRAY, R. S., NEWPORT, C. C., KOTZ, D., AND PERRONE, L. F. Empirical validation of wireless models in simulations of ad hoc routing protocols. *Simulation* 81, 4 (2005), 307–323.
- [22] LI, L. *Routing and topology control in multihop wireless ad hoc networks*. Tese de Doutorado, Cornell University, Ithaca, NY, USA, 2001.
- [23] BROCH, J., MALTZ, D. A., JOHNSON, D. B., HU, Y.-C., AND JETCHEVA, J. A performance comparison of multi-hop wireless ad hoc network routing protocols. In *Proceedings of the 4th ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking, MobiCom'98* (Dallas, Texas, United States, 1998), ACM Press, pp. 85–97.
- [24] BETTSTETTER, C. Smooth is better than sharp: A random mobility model for simulation of wireless networks. In *Proc. ACM Intern. Workshop on Modeling, Analysis, and Simulation of Wireless and Mobile Systems (MSWiM)* (Rome, Italy, julho de 2001).
- [25] CAMPOS, C. A. V., AND DE MORAES, L. F. M. A Markovian Model Representation of Individual Mobility Scenarios in Ad Hoc Networks and Its Evaluation. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking* 2007 (2007). 14 pages.
- [26] RHEE, I., SHIN, M., HONG, S., LEE, K., AND CHONG, S. On the Levy-walk Nature Human Mobility. In *Proc. of the IEEE Infocom'08* (Phoenix, Arizona, USA, 2008), pp. 1597–1605.

- [27] HONG, X., GERLA, M., PEI, G., AND CHIANG, C. A group mobility model for ad hoc wireless networks, 1999.
- [28] TIAN, J., HAEHNER, J., BECKER, C., STEPANOV, I., AND ROTHERMEL, K. Graph-based mobility model for mobile ad hoc network simulation. In *SS '02: Proceedings of the 35th Annual Simulation Symposium* (Washington, DC, USA, 2002), IEEE Computer Society, p. 337.
- [29] SADAGOPAN, N., BAI, F., KRISHNAMACHARI, B., AND HELMY, A. Paths: analysis of path duration statistics and their impact on reactive manet routing protocols. In *ACM MobiHoc'03* (2003), pp. 245–256.
- [30] BOHACEK, S., AND SRIDHARA, V. The graphical properties of manets in urban environments. In *in The Forty-Second Annual Allerton Conference on Communication, Control, and Computing* (2004).
- [31] LENDERS, V., WAGNER, J., AND MAY, M. Analyzing the impact of mobility in ad hoc networks. In *REALMAN '06: Proceedings of the 2nd international workshop on Multi-hop ad hoc networks: from theory to reality* (New York, NY, USA, 2006), ACM, pp. 39–46.
- [32] SANTI, P. The critical transmitting range for connectivity in mobile ad hoc networks. *IEEE Transactions on Mobile Computing* 4 (2005), 310–317.
- [33] BETTSTETTER, C. On the connectivity of ad hoc networks. *Special Issue on Mobile and Pervasive Computing* 47 (2004), 432–447.
- [34] FIORE, M., AND HÄRRI, J. The networking shape of vehicular mobility. In *ACM MobiHoc'08* (Hong Kong, China, 2008), pp. 261–272.
- [35] KUHN, F., AND ZOLLINGER, A. Ad-hoc networks beyond unit disk graphs. In *DIALM-POMC '03: Proceedings of the 2003 joint workshop on Foundations of mobile computing* (New York, NY, USA, 2003), ACM, pp. 69–78.
- [36] BREU, H., AND KIRKPATRICK, D. G. Unit disk graph recognition is np-hard. *Comput. Geom.* 9, 1-2 (1998), 3–24.

- [37] BOLLOBAS, B. *Random Graphs*. Cambridge University Press, 2001.
- [38] LOPEZ-FERNANDEZ, L., ROBLES, G., AND GONZALEZ-BARAHONA, J. Applying social network analysis to the information in cvs repositories. In *IEEE MSR* (2004), pp. 101–105.
- [39] The international network for social network analysis (insna). URL <http://www.insna.org/>. Último acesso em 16/03/2009.
- [40] ALBERT, R. Z. *Statistical mechanics of complex networks*. Tese de Doutorado, University of Notre Dame, Notre Dame, IN, USA, 2001.
- [41] MARINA, M. K., AND DAS, S. R. Ad hoc on-demand multipath distance vector routing: Research articles. *Wirel. Commun. Mob. Comput.* 6, 7 (2006), 969–988.
- [42] BEZERRA, R. L., CAMPOS, C. A. V., AND DE MORAES, L. F. M. 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 *Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores(SBRC)* (Brasil, 2009).
- [43] BEZERRA, R. L., CAMPOS, C. A. V., AND DE MORAES, L. F. M. A mobilidade humana aplicada na análise da conectividade em redes ad hoc. In *Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores(SBRC)* (Brasil, 2009).
- [44] Trimble GPS Pathfinder Office software. URL <http://www.trimble.com/pathfinderoffice.shtml>. Último acesso em 04/01/2009.
- [45] QIMING, L. The Scenario Generator: a tool to generate MANET mobility scenarios for NS-2. <http://www.comp.nus.edu.sg/liqm/scengen/>. Visitado em 10/01/2009.
- [46] North carolina state university - networking research lab - mobility and dtn group. URL <http://netsrv.csc.ncsu.edu/twiki/bin/view/Main/MobilityDTN>. Último acesso em 16/01/2009.

- [47] JARDOSH, A. P., BELDING-ROYER, E. M., ALMEROOTH, K. C., AND SURI, S. Real-world environment models for mobile network evaluation. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications* 23 (2005), 622–632.