

UM NOVO MODELO DE MOBILIDADE PARA REDES SEM FIO:
DISTRIBUIÇÕES EXATAS PARA VELOCIDADE E DIREÇÃO COM
APLICAÇÕES EM SIMULAÇÕES PERFEITAS

Eduardo Martins Hargreaves

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA
COORDENAÇÃO DOS PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE
ENGENHARIA 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. Cláudio Luis de Amorim, Ph.D

Prof. Edison Ishikawa, D.Sc

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

SETEMBRO DE 2006

HARGREAVES, EDUARDO MARTINS

Um Novo Modelo de Mobilidade Para Redes Sem Fio: Distribuições Exatas Para Velocidade e Direção com Aplicações em Simulações Perfeitas [Rio de Janeiro] 2006

XVII, 94 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ, M.Sc., Engenharia de Sistemas e Computação, 2006)

Dissertação - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE

1. Modelos de Mobilidade
2. Redes Móveis Ad Hoc
3. Simulações
4. Avaliação de Desempenho

I. COPPE/UFRJ II. Título (série)

Dedicatória

Dedico esse trabalho aos meus pais Alberto e Márcia que sempre me amaram, me apoiaram e fizeram de tudo para que eu pudesse me dedicar somente aos estudos. Agora chegou a hora de retribuir todo o carinho que recebi ao longo da minha vida.

Agradecimentos

“Se vi mais longe, foi porque estava sobre os ombros de gigantes ”

- Isaac Newton

Aos meus pais Alberto e Márcia, às minhas avós Vera e Leonor *In Memoriam*, por todo carinho, amor, confiança e ensinamentos. Sem vocês eu nunca teria chegado tão longe.

Agradeço 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 Edison Ishikawa pela valiosa contribuição expressa através das críticas, comentários e sugestões.

Agradeço a toda equipe do Laboratório Ravel pelo apoio, companheirismo e amizade. Agradeço a todos os amigos que conquistei durante este período, em especial: Mendes, Vilela, Cláudia, Marcos e Micheline. Agradecimentos em particular aos amigos Beto, Bruno, Paulo, Diogo e Airon pelas intensas discussões, pelas idéias fornecidas, pela troca de conhecimentos, pela amizade e por toda a ajuda durante os momentos difíceis.

Agradeço acima de tudo à Bebeta pela companhia nos melhores e piores momentos. Obrigado pelo seu carinho nos instantes de angústia, pela sua ternura nos momentos de tristeza e pela alegria nas horas felizes.

À Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ), à CAPES e à FINEP pelo financiamento da pesquisa e ao Programa de Engenharia de Sistemas e Computação (PESC/COPPE/UFRJ), pelo apoio operacional.

À minha equipe de trabalho no Serviço Federal de Processamento de Dados (SERPRO) pelo apoio, pela amizade e pela compreensão da importância deste feito.

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

UM NOVO MODELO DE MOBILIDADE PARA REDES SEM FIO:
DISTRIBUIÇÕES EXATAS PARA VELOCIDADE E DIREÇÃO COM
APLICAÇÕES EM SIMULAÇÕES PERFEITAS

Eduardo Martins Hargreaves

Setembro/2006

Orientador: Luís Felipe Magalhães de Moraes

Programa: Engenharia de Sistemas e Computação

Modelos de mobilidade são usados para representar a movimentação de dispositivos móveis em simulações de redes *ad hoc*. Nestas avaliações a escolha do modelo de mobilidade tem um impacto significativo nos resultados obtidos. Recentes anomalias observadas na evolução do comportamento de modelos de mobilidade com o passar do tempo revelam a necessidade da realizações de simulações perfeitas, isto é, simulações cujo resultado final não apresenta nenhuma componente transiente. Dentro deste contexto, neste trabalho é proposto um novo modelo de mobilidade Markoviano baseado em um processo de nascimento e morte. Suas estruturas especiais o tornam analiticamente tratável permitindo assim a obtenção de fórmulas fechadas para as distribuições estacionárias de velocidade e de direção, mesmo quando o número de estados da cadeia de Markov for muito grande. Estas fórmulas ajudam a entender como os parâmetros influenciam o perfil de movimentação de uma estação móvel possibilitando ajustar tais parâmetros de acordo com o perfil de movimentação que se quer representar. O conhecimento destas *Distribuições Estacionárias* permitiu o desenvolvimento de um método de inicialização de simulações em que a distribuição inicial da cadeia de Markov é idêntica a distribuição no regime estacionário possibilitando a realização de simulações perfeitas com o modelo proposto. Através de simulações a necessidade de simulações perfeitas é demonstrada pela diferença entre o comportamento do modelo na fase transiente e em regime estacionário. A comparação realizada entre o modelo de mobilidade proposto, o *Random Waypoint* e o MMIG indicou que o novo modelo representa melhor os padrões esperados de movimentação. O impacto dos modelos de mobilidade nas avaliações de desempenho do protocolo de roteamento AODV é demonstrado realçando a necessidade de uma escolha criteriosa de um modelo de mobilidade.

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

A NEW MOBILITY MODEL FOR WIRELESS NETWORKS: EXACT
DISTRIBUTIONS OF SPEED AND DIRECTION WITH APLICATIONS IN
PERFECT SIMULATIONS

Eduardo Martins Hargreaves
September/2006

Advisor: Luís Felipe Magalhães de Moraes
Department: Systems Engineering and Computer Science

Mobility models are used to represent the movement behavior of mobile devices in *ad hoc* networks simulations. The choice of the mobility model has an important impact on the results obtained via simulations. Recent anomalies discovered in the evolution with time of the mobility model's behavior give a strong argument in favor of running perfect simulations, that is, simulations free of transient components. In this context, this work presents a new Markovian mobility model based on a birth-death stochastic process. By exploiting the special structures of the model, explicit expressions for the steady-state distributions of direction and speed can be found, even when the number of states becomes very large. These expressions help to understand how the parameters of the model influence the movement pattern of mobile nodes. Thus, it is possible to adjust the parameters according to the movement profile intended to be represented. Perfect simulations can be run because the knowledge of this *Steady-State Distributions* allows the initial distributions to be identical to the steady-state distributions. The need for perfect simulations is shown by the difference between the transient phase and the steady-state phase behavior demonstrated through the simulation results. The comparison made between the proposed model, the MMIG, the RWP and the RWP with perfect simulations shows that the proposed model has the best mobility patterns. The proposed model is applied in the performance evaluation of the AODV routing protocol and the impact of the mobility model in performance evaluation is demonstrated. The results give arguments in favor of the right choice of the mobility model.

Lista de Acrônimos

| | | |
|-------|---|---|
| AODV | : | <i>Ad Hoc On-Demand Distance Vector Routing;</i> |
| CBR | : | <i>Constant Bit Rate;</i> |
| DSDV | : | <i>Destinations-Sequenced Distance-Vector;</i> |
| DSR | : | <i>Dynamic Source Routing;</i> |
| EM | : | <i>Estação Móvel;</i> |
| IEEE | : | <i>Institute of Eletrical and Eletronics Engineers;</i> |
| IETF | : | <i>Internet Engineering Task Force;</i> |
| MAC | : | <i>Media Access Control;</i> |
| MANET | : | <i>Mobile Ad Hoc Networks;</i> |
| MMIG | : | <i>Modelo Markoviano de Mobilidade Individual Genérico;</i> |
| NS | : | <i>Network Simulator;</i> |
| IEEE | : | <i>Institute of Electrical and Electronic Engineers;</i> |
| QoS | : | <i>Quality of Service;</i> |
| RFC | : | <i>Request for Comments;</i> |
| RWP | : | <i>Random Waypoint;</i> |
| WLAN | : | <i>Wireless Local Area Network;</i> |

Notações

- b : é a base da velocidade atual;
- N : Número de estados da cadeia em um sentido de uma direção;
- n : Estado atual da cadeia de Markov na direção \vec{x} ;
- m : Estado atual da cadeia de Markov na direção \vec{y} ;
- λ : Taxa de Aumento de Velocidade do Modelo;
- μ : Taxa de Redução de Velocidade do Modelo;
- ρ : razão entre λ e μ ;
- p_n : Probabilidade do Estado da Cadeia de Markov ser n em Regime Estacionário;
- $F_T(t)$: Distribuição cumulativa da probabilidade de não haver mudança de direção;

Conteúdo

| | |
|--------------------------------------|-----------|
| Resumo | v |
| Abstract | vi |
| Lista de Acrônimos | vii |
| Notações | viii |
| Lista de Figuras | xiii |
| Lista de Tabelas | xvii |
| 1 Introdução | 1 |
| 1.1 As Redes <i>Ad Hoc</i> | 3 |
| 1.2 Motivação | 4 |
| 1.3 Objetivo | 6 |
| 1.4 Contribuições | 7 |
| 1.5 Organização | 8 |
| 2 Modelos de Mobilidade | 10 |
| 2.1 Visão Geral | 10 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 2.2 | Modelos de Mobilidade utilizados em Redes <i>Ad Hoc</i> | 11 |
| 2.2.1 | <i>Random Waypoint</i> (RWP) | 12 |
| 2.2.2 | <i>Random Walk</i> | 14 |
| 2.2.3 | <i>Smooth</i> | 16 |
| 2.2.4 | MMIG | 16 |
| 2.3 | Perfis de Mobilidade | 18 |
| 2.4 | Regras de Borda | 19 |
| 2.4.1 | <i>Wrap Around</i> | 19 |
| 2.4.2 | <i>Bounce</i> | 19 |
| 2.4.3 | <i>Delete and Replace</i> | 20 |
| 2.4.4 | Efeitos das Regras de Borda na Densidade de Estações na Área de Simulação | 21 |
| 2.5 | Transiência dos Modelos de Mobilidade | 22 |
| 2.6 | Discussão | 23 |
| 3 | Modelo de Mobilidade Proposto | 25 |
| 3.1 | Descrição do modelo | 26 |
| 3.2 | Perfis de Mobilidade | 30 |
| 4 | Distribuições Estacionárias | 33 |
| 4.1 | Análise Estacionária da Distribuição da Velocidade | 33 |
| 4.1.1 | Movimento Unidimensional | 34 |
| 4.1.2 | Movimento Bidimensional | 37 |
| 4.2 | Análise Estacionária da Distribuição da Direção | 40 |

| | |
|---|-----------|
| <i>CONTEÚDO</i> | xi |
| 5 Simulações Perfeitas | 48 |
| 5.1 Métodos de Remoção da Fase Transiente | 48 |
| 5.2 Método de Realização de Simulações Perfeitas | 50 |
| 6 Resultados Numéricos | 54 |
| 6.1 Validação da Implementação | 55 |
| 6.1.1 Cenário das Simulações | 55 |
| 6.1.2 Resultados | 56 |
| 6.2 Análise da Metodologia de Realização de Simulações sem Fase Tran- siente | 57 |
| 6.2.1 Métricas | 57 |
| 6.2.2 Cenário das Simulações | 60 |
| 6.2.3 Resultados | 60 |
| 6.3 Avaliação Comparativa com Outros Modelos de Mobilidade | 63 |
| 6.3.1 Métricas | 64 |
| 6.3.2 Cenário das Simulações | 65 |
| 6.3.3 Resultados | 65 |
| 6.4 Aplicação das Distribuições Estacionárias na Criação de Perfis de Mobilidade | 68 |
| 6.5 Aplicação do Modelo Proposto em Redes <i>Ad Hoc</i> | 71 |
| 6.5.1 Métricas | 72 |
| 6.5.2 Cenário das Simulações | 73 |
| 6.5.3 Resultados | 75 |

| | |
|---|-----------|
| <i>CONTEÚDO</i> | xii |
| 7 Conclusões e Perspectivas de Trabalhos Futuros | 83 |
| 7.1 Conclusões | 83 |
| 7.2 Perspectivas de Trabalhos Futuros | 85 |
| Bibliografia | 87 |

Lista de Figuras

| | | |
|-----|---|----|
| 2.1 | Exemplo de um rastro de movimentação de uma estação móvel quando esta se desloca de acordo com o modelo de movimentação RWP | 15 |
| 2.2 | Exemplo de um rastro de movimentação de uma estação móvel quando esta se desloca de acordo com o modelo de movimentação MMIG . . . | 17 |
| 2.3 | Regra de Borda <i>Wrap Around</i> | 20 |
| 2.4 | Regra de borda <i>bouce</i> | 20 |
| 2.5 | Regra de Borda <i>Delete and Replace</i> | 21 |
| 3.1 | Cadeias de Markov governando a movimentação: (a)no eixo x, (b)no eixo y | 29 |
| 3.2 | Diagrama de estados com duas variáveis de estado | 30 |
| 3.3 | Exemplo 1: $b = 4$, $N = 1$, $\lambda = 0.02$ e $\mu = 0.02$ | 31 |
| 3.4 | Exemplo 2: $b = 1.25$, $N = 4$, $\lambda = 0.01$ e $\mu = 0.01$ | 32 |
| 3.5 | Exemplo 3: $b = 1.25$, $N = 2$, $\lambda = 0.01$ e $\mu = 0.01$ | 32 |
| 4.1 | Variação de $P_n(\%)$ em função de n ($\rho = 0.5$) | 38 |
| 4.2 | Variação de $P_n(\%)$ em função de n ($\rho = 1.5$) | 39 |
| 4.3 | Variação de $P_n(\%)$ em função de n ($\rho = 1$) | 40 |
| 4.4 | Variação de $P_v(\%)$ em função de n e m ($\rho = 0.5$) | 41 |

| | | |
|-----|---|----|
| 4.5 | Variação de $P_v(\%)$ em função de n e m ($\rho = 1.5$) | 42 |
| 4.6 | Variação de $P_v(\%)$ em função de n e m ($\rho = 1$) | 43 |
| 4.7 | Variação da probabilidade de se estar: (a) em repouso (b) na velocidade máxima em função de ρ | 45 |
| 4.8 | Distribuição cumulativa da probabilidade do tempo de pausa ser menor que t | 46 |
| 4.9 | Distribuição cumulativa da probabilidade de não haver mudança de direção quando a estação está (a) na velocidade máxima (b) nas velocidades intermediárias em função do tempo | 47 |
| 5.1 | Evolução do comportamento do RWP com o tempo: (a) Velocidade, (b) Número médio de contatos | 53 |
| 6.1 | Validação da Implementação quando $\rho = 1$: Confrontação dos resultados previstos pela modelagem analítica (linha cheia) com os pontos obtidos via simulação. | 56 |
| 6.2 | Validação da Implementação quando $\rho = 0,5$: Confrontação dos resultados previstos pela modelagem analítica (linha cheia) com os pontos obtidos via simulação. | 57 |
| 6.3 | Validação da Implementação quando $\rho = 1,5$: Confrontação dos resultados previstos pela modelagem analítica (linha cheia) com os pontos obtidos via simulação. | 58 |
| 6.4 | Análise da Metodologia de Realização de Simulações sem Fase Transiente: Velocidade Média em Função do Tempo | 61 |
| 6.5 | Análise da Metodologia de Realização de Simulações sem Fase Transiente: Número Médio de Nós dentro do Raio da Alcance em função do tempo | 62 |

| | | |
|------|---|----|
| 6.6 | Análise da Metodologia de Realização de Simulações sem Fase Transiente: Quantidade Média de Novos Contatos em função do tempo . . . | 63 |
| 6.7 | Análise da Metodologia de Realização de Simulações sem Fase Transiente: Quantidade Média de Contatos Perdidos em função do tempo | 64 |
| 6.8 | Quantidade de Mudanças Bruscas de Direção em função do modelo de mobilidade | 66 |
| 6.9 | Quantidade Normalizada de Mudanças Bruscas de Direção em função do modelo de mobilidade | 67 |
| 6.10 | Quantidade Total de Acelerações Bruscas em função do modelo de mobilidade | 68 |
| 6.11 | Quantidade Normalizada de Acelerações Bruscas em função do modelo de mobilidade | 69 |
| 6.12 | Perfil de Alta Velocidade: $\lambda = 2$, $\mu = 1$, $b=2, n=4$, tempo de simulação=200s | 70 |
| 6.13 | Perfil de baixa Velocidade: $\lambda = 1$, $\mu = 2$, $b=2, n=4$, tempo de simulação=200s | 70 |
| 6.14 | Perfil com muitas mudanças de direção: $\lambda = \mu = 10$, $b=2, n=4$, tempo de simulação=200s | 71 |
| 6.15 | Perfil com poucas mudanças de direção: $\lambda = \mu = 0.01$, $b=2, n=4$, tempo de simulação=200s | 72 |
| 6.16 | Avaliação da influência do modelo de mobilidade sobre: (a) Sobrecarga de roteamento, (b) taxa de entrega de pacotes em função da quantidade de conexões ativas, quando a velocidade máxima é fixada em 2m/s | 78 |

- 6.17 Avaliação da influência do modelo de mobilidade sobre: (a) Sobrecarga de roteamento, (b) taxa de entrega de pacotes em função da quantidade de conexões ativas, quando a velocidade máxima é fixada em 4m/s 79
- 6.18 Avaliação da influência do modelo de mobilidade sobre: (a) Sobrecarga de roteamento, (b) taxa de entrega de pacotes em função da quantidade de conexões ativas, quando a velocidade máxima é fixada em 8m/s 80
- 6.19 Avaliação da influência do modelo de mobilidade sobre: (a) Sobrecarga de roteamento, (b) taxa de entrega de pacotes em função da quantidade de conexões ativas, quando a velocidade máxima é fixada em 12m/s 81
- 6.20 Avaliação da influência do modelo de mobilidade sobre: (a) Sobrecarga de roteamento, (b) taxa de entrega de pacotes em função da velocidade (20 conexões ativas) 82

Lista de Tabelas

| | | |
|-----|---|----|
| 6.1 | Parâmetros de Configuração do Modelo Proposto | 73 |
| 6.2 | Parâmetros de Configuração do MMIG | 73 |
| 6.3 | Parâmetros de Configuração do RWP | 74 |

Capítulo 1

Introdução

“Devemos julgar um homem mais pelas suas perguntas que pelas suas respostas” - Voltaire

ATUALMENTE a humanidade está vivendo uma grande revolução causada pela Internet. A enciclopédia livre Wikipédia [73] escrita de modo totalmente descentralizado por diversos internautas, todos eles colaboradores espontâneos, mantida sem fins lucrativos e que hoje tem mais de 3,5 milhões de artigos, está entre os sítios mais visitados do mundo e revolucionou a forma como o conhecimento humano é armazenado e distribuído. O sítio de notícias Digg [67] é mantido por *internautas* que vasculham a Internet para encontrar notícias. Eles publicam esses novos itens no Digg, onde outros membros da comunidade os classificam. Esta classificação de reportagens determina sua importância, corrige erros, critica jornalistas, rebate erros de apuração, acha argumentos contrários e revela informação relacionada. O sítio de vídeos Youtube [28] permite que qualquer pessoa capaz de fazer um vídeo caseiro criativo se torne um sucesso. Os sítios Orkut [11] e MySpace [1] alteraram a forma como nos relacionamos. Estes são apenas alguns exemplos desta nova era que está começando.

Esta revolução é tão grande que Pierre Lévy no manifesto dos planetários [47] denominou a grande expansão das nossas capacidades cognitivas entre elas a memória (através dos bancos de dados) e o raciocínio (inteligência artificial) aliados a retração

do espaço causado pelas redes de computadores como uma revolução noolítica¹ cuja consequência principal é um mundo sem fronteiras e totalmente interconectado cujo maior ativo é inteligência coletiva.

Uma vez acostumados ao poder e às conveniências destas novas aplicações, a tendência é de que as pessoas queiram acessá-las a qualquer hora e em qualquer lugar. Neste contexto, a comunicação móvel sem fio é um meio de suprir esta necessidade de se estar sempre “conectado” e vem se tornando realidade graças ao aumento de processamento dos dispositivos computacionais em conjunto com uma redução de custos e do tamanho destes dispositivos. Celulares, PDAs, *smartphones*, *notebooks* a cada dia que passa são mais populares. Aparelhos como o Sony Mylo [71], Blackberry [9], Palm Treo [61] acessam a internet, permitem a leitura de *e-mails*, o compartilhamento de arquivos, tocam música, vídeos e visualizam fotos. .

Uma vez que a comunicação se tornou livre dos fios, ela deve ser realizada até mesmo em situações onde não haja nenhuma infraestrutura. Para tanto, os dispositivos móveis devem ser capazes de se comunicar entre si instantaneamente e com o mínimo possível de intervenção humana. É por este motivo que as redes *Ad Hoc* vêm sendo amplamente estudadas. De acordo com a Referência [63], as redes *ad hoc* são redes criadas sob demanda, permitindo a comunicação entre os dispositivos computacionais sem fio, diretamente ou através de múltiplos saltos, sem a necessidade de haver nenhuma infra-estrutura. Uma rede *ad hoc* pode ser formada por 15 executivos com seus *notebooks*, conectados através de suas interfaces de rede sem fio, mesmo em lugares onde não exista nenhum ponto de acesso, permitindo, por exemplo, o compartilhamento de arquivos. É claro que para esta comunicação “instantânea” as estações móveis pertencentes a uma rede *ad hoc* devem ser mais do que simples estações, elas devem executar tarefas de equipamentos de *backbones* como roteadores. As principais características das redes *ad hoc* serão descritas com mais detalhes na próxima seção.

¹Noolítico é um termo que parte do prefixo “noo”, relativo ao “espírito”, destacando o carácter abstrato desta revolução em contraposição à pedra de revolução paleolítica [47]

1.1 As Redes *Ad Hoc*

Os dispositivos móveis que compõem uma rede *ad hoc* se auto-configuram e se auto-organizam dinamicamente de uma forma totalmente distribuída. Estas redes são atraentes porque se formam instantaneamente, se configuram dinamicamente e provêm uma grande flexibilidade acrescentando então novas aplicações às redes sem fio[65]. A comunicação entre as estações móveis pode ser feita diretamente ou através de múltiplos saltos. Para tanto, as estações móveis além de serem capazes de executar suas aplicações, devem ter a capacidade de atuar como roteadores dentro destas redes.

Entre as principais características das redes *ad hoc* podem-se citar: alta tolerância a falhas, largura de faixa limitada, rápida instalação, problemas com o consumo de energia e, principalmente, topologia dinâmica causada pela mobilidade.

Os protocolos de roteamento projetados para redes *ad hoc* devem se adaptar à mudanças freqüentes e imprevisíveis na topologia da rede causadas pela mobilidade, utilizando os recursos de forma eficiente. Sendo assim, a IETF (*Internet Engineering Task Force*) criou um grupo de trabalho denominado MANET (*Mobile Ad Hoc Networks*) [48] com o objetivo de: “estudar e padronizar funcionalidades do protocolo IP com aplicações em roteamento para redes sem fio com topologias que podem ser estáticas ou dinâmicas”. Este grupo já publicou quatro *Request For Comments* - RFCs, a RFC 2501 que é sobre a visão geral de redes *ad hoc* [16] e mais três RFCs sobre protocolos de roteamento otimizados para as redes *ad hoc*. Além disto, existem 6 *drafts*, onde, três destes especificam protocolos de roteamento, um descreve um protocolo de transmissão com encaminhamento para endereços *multicast*, outro especifica um protocolo para o descobrimento da topologia e o último descreve um formato para os pacotes MANET.

Entre os protocolos desenvolvidos especialmente para as redes *ad hoc* pode-se citar o AODV - *Ad Hoc On-Demand Distance Vector Routing* descrito na RFC 3561 [64], o OLSR - *Optimized Link State Routing* descrito na RFC 3561 [15] e o TBRPF - *Topology Dissemination Based on Reverse-Path Forwarding* descrito na

RFC 3684 [58]. Existe ainda um *draft* para o protocolo de roteamento DSR - *The Dynamic Source Routing Protocol for Mobile Ad Hoc Networks* [33] que também é muito encontrado na literatura.

Atualmente as redes *ad hoc* estão deixando de ser uma utopia e estão se tornando realidade. Já existem implementações de *testbeds* de redes *ad hoc* [57][59], implementações de protocolos de roteamento tanto para sistemas operacionais Windows [52] quanto para sistemas operacionais Linux [56][72]. No entanto, ainda é necessário realizar uma série de avaliações antes de se ter a certeza de que estas redes possam funcionar de maneira adequada perante à mobilidade. Conforme será visto na próxima seção, não é tão simples realizar estas avaliações, principalmente quando é necessário representar a movimentação dos usuários quando compõem uma rede *ad hoc*. É desta dificuldade que nasceu a motivação desta dissertação.

1.2 Motivação

O suporte a mobilidade previsto pelas redes *ad hoc* implica em uma série de novos desafios e problemas, entre eles: necessidade de desenvolvimento de protocolos de roteamento específicos, busca por qualidade de serviço, cálculo da capacidade máxima e consumo de energia. Cada solução desenvolvida deve ser muito bem avaliada antes de entrar em produção. Nestas avaliações, são empregados modelos de mobilidade na tentativa de representar a movimentação dos usuários. Uma vez que os sistemas móveis são caracterizados pela sua movimentação, a natureza do movimento (velocidade, direção e taxa de mudança de direção) tem um impacto significativo nas avaliações das soluções desenvolvidas, podendo inclusive, levar a conclusões equivocadas. É, portanto, de extrema importância a busca por modelos de mobilidades que representem bem a realidade ou que pelo menos, capturem as características mais relevantes de movimentação de usuários reais. Pesquisas em torno desta procura por uma representação realista da mobilidade podem ser encontradas em [31], [12] e [14].

Existem três formas de se avaliar o desempenho de um sistema, e no caso es-

pecífico desta dissertação, as soluções desenvolvidas especificamente para as redes *ad hoc* [35] [30]: construir um modelo analítico e derivar expressões matemáticas explícitas para o seu funcionamento, realizar simulações ou construir um sistema real e medir o seu desempenho.

De acordo com [30], a modelagem analítica é a forma mais elegante e oferece a maior compreensão a respeito do funcionamento de um sistema e a relação entre seus diversos parâmetros, mas em contrapartida, é a mais difícil de se obter. Muitas vezes para se obter um modelo analítico é preciso assumir tantas hipóteses e simplificações que o modelo acaba perdendo todo o seu apelo físico. As simulações podem incorporar mais detalhes e necessitam que menos hipóteses sejam assumidas, levando a resultados mais próximos da realidade. No entanto, é mais difícil avaliar os compromissos existentes entre as diversas variáveis de um sistema usando-se simulações. Medir o sistema real tem a grande desvantagem da necessidade da construção destes sistemas. Esta construção pode custar caro, além de só poder ser realizada em sistemas já existentes ou em fase final de desenvolvimento.

No caso particular de avaliações de desempenho de protocolos desenvolvidos especialmente para redes *ad hoc*, a simulação é a metodologia mais utilizada por ser capaz de incorporar uma série de parâmetros relevantes como modelos de tráfego, de propagação e de mobilidade. Além de ser capaz de simularem o funcionamento dos protocolos de roteamento e de acesso ao meio.

Nestas simulações o modelo de mobilidade mais utilizado é o *Random Waypoint* [37]. Este modelo, que será descrito na Seção 2.2.1, apesar de parecer simples à primeira vista, apresenta comportamentos bastante complexos[43]. Entre estes comportamentos pode-se citar: a redução da velocidade com o passar do tempo [75], concentração dos nós [54] e [8], e lenta convergência para o estado estacionário [12] e [43].

Esta diferença de comportamento com a evolução do tempo implica em uma diferença entre o comportamento observado no estado transiente e no estado estacionário. Se o objetivo da simulação for representar o comportamento de longo prazo do sistema, os resultados obtidos não devem ser função do tempo de simulação. Se

este for o caso, a componente transiente não pode estar presente no resultado final. De acordo com [60], estas características, que não são intuitivas e só foram descobertas quando as distribuições estacionárias do RWP foram encontradas, influenciaram os resultados das simulações que envolveram este modelo de mobilidade. Em [43], [54], [76] foram propostas metodologias para a construção de modelos de mobilidade sem esta componente transiente.

No entanto, em [13] a partir de um conjunto de métricas constatou-se que existe um modelo denominado *Modelo Markoviano de Mobilidade Genérico* que representa melhor a realidade do que o RWP. Neste trabalho, que será descrito na Seção 2.2.4 foi observado também que alguns protocolos de roteamento apresentam um desempenho “superestimado” quando o modelo RWP é utilizado. No entanto, na época em que este trabalho foi realizado ainda não havia uma preocupação com a transiência dos modelos de mobilidade e por isto não foi feito um estudo buscando confrontar o comportamento do MMIG em regime estacionário com o comportamento do MMIG na fase transiente.

Uma vez que o MMIG representa melhor a realidade que o RWP e que os resultados das simulações sofrem muita influência dos modelos de mobilidade, continuar a pesquisa sobre Modelos de Mobilidade Markovianos é um caminho natural e que pode apresentar diversos problemas a serem solucionados.

1.3 Objetivo

Seguindo a premissa de que a modelagem analítica, quando possível, é a melhor forma de se compreender a relação entre as variáveis de um sistema, o objetivo desta dissertação é obter um modelo de mobilidade Markoviano analítico. Se a natureza da movimentação é caracterizada pela forma como a velocidade e a direção variam, a obtenção de distribuições estacionárias de velocidade e de mudança de direção podem vir a auxiliar o entendimento do modo como os modelos de mobilidade interferem nos resultados obtidos via simulação e desta forma aumentar a precisão destes resultados.

As distribuições estacionárias também podem vir a ajudar a atribuição dos pa-

râmetros de configuração do sistema, de forma a gerar diversos perfis de mobilidade mais adequados aos cenários que se queira representar.

Por fim, a obtenção das distribuições estacionárias implica em conhecer o comportamento do sistema em estado estacionário. Este é o primeiro passo para a realização de simulações perfeitas de mobilidade, isto é, simulações que não apresentam nenhum componente transiente[43].

1.4 Contribuições

De forma a atender os objetivos definidos na seção anterior, neste trabalho foi proposto um modelo de mobilidade Markoviano, com estruturas especiais, baseado em um processo estocástico de nascimento e morte. Tais estruturas quando exploradas, permitiram uma avaliação mais profunda, levando-se a fórmulas fechadas para as distribuições de probabilidade no estado estacionário, mesmo quando o número de estados da cadeia de Markov é muito grande.

A partir da modelagem analítica realizada no Capítulo 4 é possível entender como os parâmetros de configuração do modelo influenciam o perfil de movimentação de uma estação móvel permitindo um melhor ajuste dos mesmos. Estes parâmetros viabilizam a adaptação do modelo proposto a diversos cenários de simulações possíveis. Através destas fórmulas é possível saber como definir perfis de alta ou baixa velocidade, perfis com muitas ou poucas mudanças de direção e entender como os nós se movimentam.

Além disto, o conhecimento das *Distribuições Estacionárias* permitiu que a distribuição inicial da cadeia de Markov seja idêntica à distribuição no regime estacionário evitando, desta forma, a necessidade de uso de métodos de remoção da fase transiente.

Para a aplicação do modelo proposto foi desenvolvido um simulador próprio de movimentação escrito na linguagem C de programação. A saída desta nova ferramenta é totalmente compatível com o simulador de redes NS -*Network Simulator*

[21] uma vez que o *trace* gerado pela ferramenta pode servir de entrada para as simulações de redes móveis *Ad Hoc* realizadas no NS. Este simulador foi escolhido por ser amplamente utilizado em simulações de redes *ad hoc* [37].

Esta compatibilidade com o NS permitiu a realização de um estudo de caso onde é avaliado o impacto do modelo de mobilidade na avaliação de desempenho do protocolo de roteamento AODV [64] conforme será visto na Seção 6.3.

A partir do exposto anteriormente, as seguintes contribuições podem ser citadas como as mais importantes desta dissertação:

- Proposta de um novo modelo de mobilidade com um conjunto de parâmetros que permitem que o modelo se ajuste ao cenário que se quer representar
- Aplicar, pela primeira vez, o processo de nascimento e morte na representação da mobilidade individual
- Desenvolvimento de um modelo de mobilidade que, de acordo com os resultados exibidos no Capítulo 6, é capaz de caracterizar melhor a movimentação do que os modelos de mobilidade RWP e MMIG
- Cálculo das Distribuições em regime estacionário de velocidade e de mudança de direção do modelo proposto
- Desenvolvimento e implementação de um método para iniciar as simulações da mobilidade no regime estacionário
- Desenvolvimento de uma ferramenta capaz de gerar cenários de mobilidade totalmente compatível com o *Network Simulator* NS

1.5 Organização

O texto desta dissertação está organizado da seguinte forma: 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 e uma breve discussão sobre estes modelos é realizada.

No Capítulo 3 o novo modelo é proposto e descrito. No Capítulo 4 é feita a modelagem analítica para a distribuição da velocidade e da direção nos estados estacionários além da realização de uma associação entre as distribuições estacionárias e os perfis de movimentação. São apresentados exemplos de como adequar os parâmetros de configuração do modelo ao cenários que se quer representar.

No Capítulo 5 é apresentado o método de realização de simulações perfeitas.

No Capítulo 6 são apresentados os resultados da avaliação comparativa entre o modelo proposto no Capítulo 3 e outros três modelos de mobilidade. A implementação do modelo proposto é validada quando confrontada com os resultados obtidos via modelagem analítica. A metodologia de realização de simulações sem fase transiente também é validada quando analisa-se a forma como determinadas métricas evoluem com o tempo. No final deste capítulo são apresentados alguns estudos de caso onde o modelo de mobilidade proposto é aplicado na avaliação de desempenho do protocolo de roteamento AODV.

Finalmente no Capítulo 7, é feita a conclusão do trabalho e perspectivas de trabalhos futuros são apresentadas.

Capítulo 2

Modelos de Mobilidade

“Um pensador é alguém que sabe como tornar as coisas mais simples do que aquilo que elas são na realidade ” - Friedrich Nietzsche, em “A Gaia Ciência”

ESTE capítulo descreve alguns dos muitos modelos de mobilidade encontrados na literatura, dando ênfase aos modelos utilizados em redes *Ad Hoc*, apresenta alguns pontos importantes na escolha do cenário que se quer representar, descreve as regras de borda para simulações de áreas limitadas, apresenta o conceito de perfil de movimentação, além de apresentar alguns dos principais problemas inerentes às simulações de redes móveis: a existência de um estado transiente que leva muito tempo para convergir para o regime permanente. Por fim, uma breve discussão sobre os modelos de mobilidade é apresentada ao final do capítulo. Excelentes tutoriais sobre o assunto podem ser encontrados em [7] e [12].

2.1 Visão Geral

Os modelos de mobilidade são empregados na avaliação de desempenho de redes móveis. Um bom modelo deve tentar imitar o padrões de movimentação de uma estação móvel real de modo que suas variações de velocidade e direção ocorram semelhantemente à maneira como elas ocorrem no mundo real.

Sendo assim, a arte da modelagem de movimentação consiste na criação de modelos que possuam algumas características esperadas de movimentação de usuários reais. De acordo com [27] e [12] não é realista um modelo de mobilidade onde as novas velocidades e direções não sejam correlacionadas com as velocidades e direções anteriores. Isto quer dizer que uma movimentação real é feita com um senso de direção e não aleatoriamente.

A maioria das simulações inicialmente distribuem as estações dentro da área de simulação de acordo com alguma distribuição inicial. A partir deste instante os modelos de mobilidade ditam os próximos passos do móvel. De acordo com [5] existem diversas categorias de modelos de mobilidade que encontram aplicações em diferentes tipos de simulações ou estudos analíticos de redes sem fio. A sua aplicação pode ser em estudos analíticos ou em simulações. A movimentação pode ser em 1, 2 ou 3 dimensões. As estações podem escolher um caminho, uma direção, uma velocidade, um ponto de destino ou combinações destes elementos. Esta escolha pode ser determinística, aleatória ou de uma forma híbrida. Os modelos podem ser de mobilidade individual ou de mobilidade em grupo, isto é, modelos em que o comportamento de movimentação de um usuário é afetado pelo comportamento de outros usuários. Podem existir ou não obstáculos nos cenários de movimentação. A área de movimentação pode ser limitada ou ilimitada. Se a área for limitada é necessária a definição de regras para o tratamento de movimentos que alcancem as bordas da área de simulação.

2.2 Modelos de Mobilidade utilizados em Redes *Ad Hoc*

Neste trabalho será dada ênfase aos modelos de mobilidade voltados para a simulação de redes *Ad Hoc*. Estes modelos procuram representar a interação entre estações móveis pertencentes a uma mesma rede sem fio. Geralmente representam a micromobilidade das estações isto é, descrevem a movimentação de uma única entidade através de uma coordenada e uma velocidade em um dado instante t .

Nesta seção serão abordados os principais modelos de mobilidade individuais para cenários sem restrições: *Random Waypoint*, *Random Walk*, *Smooth*, MPA e o MMIG.

Os modelos de mobilidade para redes *ad hoc* ao invés de serem individuais podem ser em grupo. Como exemplos de modelos de mobilidade em grupo pode-se citar o MMGPR - *Modelo de Mobilidade em Grupo com Ponto de Referência* [27] e o MMGVR - *Modelo de Mobilidade em Grupo com Velocidade de Referência* [74].

Na avaliação de desempenho de redes *ad hoc* muitas vezes é necessário avaliar o funcionamento de uma rede em ambientes aonde exista algum tipo de restrição à movimentação como é o caso das ruas em uma cidade ou salas e corredores em ambientes fechados. Como exemplos de modelos de mobilidade para ambientes com restrição pode-se citar o *City-Section Mobility Model* [12] para representar a movimentação nas ruas de uma cidade e o modelo de da Silva e de Moraes [17] para representar a movimentação em ambientes fechados. É importante observar que os obstáculos como prédios ou paredes alteram as características de propagação de ondas eletromagnéticas. Por este motivo, para simulações com modelos de mobilidade para ambientes com restrições ou fechados serem realizadas, é necessário o desenvolvimento de modelos de propagação mais adequados como é o caso do *ray tracing*[51]. No entanto, não existe nenhuma implementação destes modelos de propagação nos simuladores de redes mais utilizados: o NS [21] e o GloMoSim [49] e por este motivo, os modelos de mobilidade para ambientes com restrição não foram tratados neste trabalho. Na opinião dos autores estes modelos ganharão mais importância a medida que modelos de propagação mais adequados forem inseridos aos simuladores de redes. As referências [36] e [32] apresentam propostas neste sentido .

2.2.1 *Random Waypoint* (RWP)

Este modelo foi inicialmente proposto em [10]. Atualmente existem muitas variações deste modelo mas todas seguem a definição formal dada por [43]: Existe um domínio fechado e restrito \mathbb{D} que é um subconjunto do \mathbb{R}^2 ou do \mathbb{R}^3 . Existe um

conjunto de caminhos \mathbb{C} que ligam os pontos pertencentes ao domínio \mathbb{D} . A regra de seleção de percurso consiste em determinar como escolher um caminho que ligue dois pontos pertencentes a \mathbb{D} e qual é o tempo de duração desta viagem. Finalmente existe uma regra de inicialização que indica qual é a posição inicial, qual é o caminho inicial, qual é a posição neste caminho, e qual é o instante de tempo no qual ocorrerá a primeira transição.

Na versão mais empregada do RWP, o posicionamento inicial das estações é aleatório e usualmente segue uma distribuição de probabilidade uniforme dentro da área de simulação. A estação permanece nesta posição por um intervalo de tempo aleatório chamado de *tempo de pausa*. Após o término deste período a estação escolhe uma nova posição uniformemente dentro da área de simulação. A velocidade de deslocamento do nó V entre a origem e o destino é uniformemente distribuída entre v_{min} e v_{max} . O nó percorre o seu caminho até o destino com esta velocidade constante V . Uma vez alcançado o destino, fica estático durante o tempo de pausa e após o término deste período o processo é reiniciado.

O RWP é o modelo mais empregado em simulações de redes *ad hoc*. De acordo com [38], 64% dos artigos da conferência Mobihoc entre 2000 e 2004 que envolvem mobilidade usaram o RWP. Por ser o mais utilizado em simulações, o RWP foi exaustivamente pesquisado. Nestes estudos foram descobertas várias características capazes de influenciar dramaticamente os resultados obtidos quando este modelo é empregado. O RWP foi inicialmente investigado em [75]. Neste trabalho foi demonstrado a redução da velocidade média com o passar do tempo. Este efeito é causado pela diferença entre a média dos eventos e a média no tempo e é conhecido como *Paradoxo de Feller* [42]. Mesmo sendo a velocidade nos instantes de transição uniformemente distribuída, as estações que escolherem velocidades muito baixas levarão mais tempo para alcançar o destino do que as estações que escolherem velocidades altas. Este efeito faz com a velocidade média amostrada em intervalos de tempo constantes seja bem menor do que a velocidade média amostrada apenas nos instantes onde houve um evento de transição. Em [46] o RWP foi caracterizado como um processo de renovação e fórmulas para a distribuição estacionária da velocidade foram encontradas. Com o conhecimento destas fórmulas, foi possível descobrir a

solução para esta redução involuntária da velocidade.

Em [54] e [8] estudou-se o comportamento da distribuição estacionária das estações quando estas se locomovem de acordo com o RWP. Em ambos os trabalhos citados foi comprovado que a distribuição das estações não é uniforme dentro da área de simulação. Esta característica é indesejável uma vez que a maioria dos modelos analíticos assume que a distribuição das estações é uniforme. Uma vez que a distribuição inicial é uniforme, e a distribuição estacionária não é, analisar o sistema no estado transiente pode causar erros na análise dos resultados. Em [43] foi empregado o *Palm Calculus* para obter fórmulas estacionárias de densidade e velocidade do RWP e também foi proposto um algoritmo para iniciar as simulações já no estado estacionário. Em [54], [8] e [46] também foram propostas soluções para redução do impacto da transiência dos modelos de mobilidade. Devido a grande importância do impacto da fase transiente nos resultados obtidos via simulações, este assunto será abordado com mais detalhes na Seção 2.5.

No RWP a escolha da nova velocidade e do novo destino não tem nenhuma relação com a velocidade e o destino anterior e por isto ele é dito ser um modelo sem memória. E este é um dos seus maiores defeitos. Este problema é agravado quando a área de simulação é pequena ou a velocidade é muito alta. Um exemplo de um rastro de movimentação quando uma estação se desloca de acordo com o modelo RWP pode ser encontrado na figura 2.1.

2.2.2 *Random Walk*

Esta classe de modelos de mobilidade é baseada em um processo estocástico conhecido como *Random Walk* [34]. Normalmente a posição inicial é escolhida uniformemente dentro do espaço de estados do processo estocástico. A próxima posição é dada pela posição atual mais uma variável aleatória cujo valor é escolhido em função de uma determinada distribuição de probabilidade e independente do estado atual.

Este modelo foi empregado em simulações de redes *Ad Hoc* pela primeira vez por

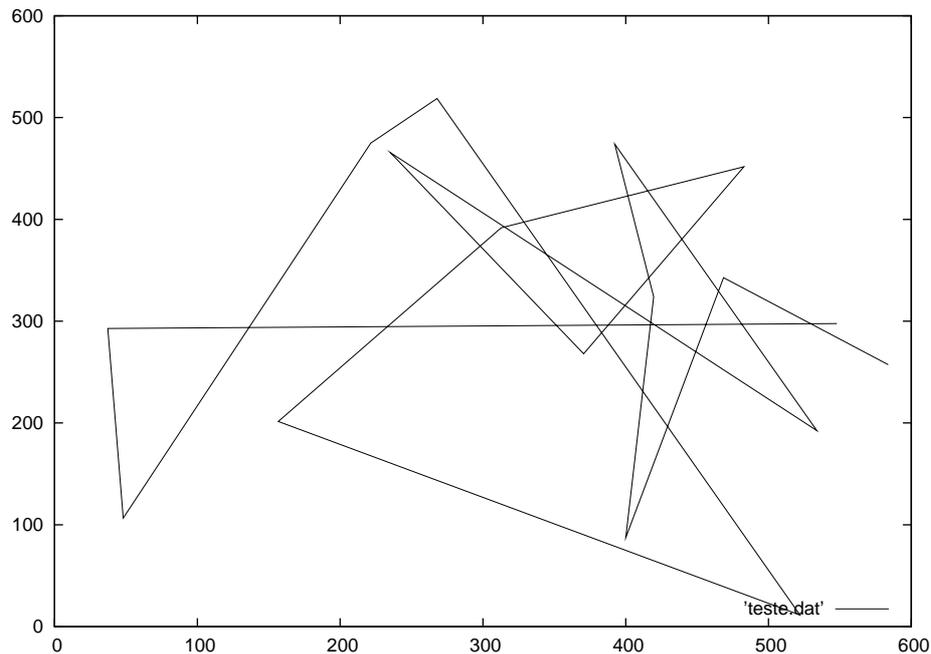


Figura 2.1: Exemplo de um rastro de movimentação de uma estação móvel quando esta se desloca de acordo com o modelo de movimentação RWP

Guérin [23]. Neste caso a próxima posição é obtida a partir da escolha de uma direção aleatória uniformemente distribuída no intervalo $[0, 2\pi]$ e a velocidade também é escolhida seguindo alguma distribuição dentro do intervalo $[v_{min}, v_{max}]$. O tempo em que a estação móvel se desloca com esta mesma direção e mesma velocidade normalmente é derivado de uma distribuição exponencial. Transcorrido este tempo aleatório, uma nova direção e uma nova velocidade são escolhidas independentemente das velocidades e direções atuais. Esta implementação também é chamada de *Random Direction*.

Este modelo foi estudado em [53],[43],[50] e comprovou-se que, em regime estacionário, as estações móveis estão uniformemente distribuídos dentro da área de simulação e a direção de movimentação das estações também é uniforme no intervalo $[0, 2\pi]$.

2.2.3 *Smooth*

De acordo com [27] e [12] não é realista um modelo de mobilidade onde as novas velocidades e direções não sejam correlatadas com as velocidade e direções anteriores. Isto quer dizer que uma movimentação real é feita com um senso de direção e não ao acaso. Este modelo tenta ser realista através de duas características: a velocidade é variada gradativamente de acordo com a aceleração da estação e as mudanças de direção geralmente são suaves durando alguns passos até que uma nova direção seja encontrada.

De forma a tornar isto possível, este modelo implementa dois processos estocásticos para guiar as mudanças de velocidade e direção. A cada deslocamento de uma estação, é gerado um número aleatório e , em função de uma probabilidade p_d , haverá, ou não, uma mudança de direção. Se houver, uma nova direção é escolhida uniformemente no intervalo $[0, 2\pi]$. Em função de uma probabilidade p_v haverá, ou não, uma mudança de velocidade. Se houver, um valor dentro de um conjunto de velocidades preferenciais é escolhido aleatoriamente respeitando as probabilidades de cada velocidade preferencial.

As alterações de velocidade são suaves. Uma aceleração é escolhida uniformemente no intervalo $[aMin; aMax]$. Deste modo, as alterações de velocidade são gradativamente realizadas até que se alcance a velocidade final.

2.2.4 MMIG

Este modelo de mobilidade [13] usa uma cadeia de Markov de parâmetro discreto [34] para simular a movimentação de um nó. A idéia é usar a memória contida nos estados da cadeia de Markov para dar um senso de direção ao deslocamento de um nó.

Neste modelo são utilizados duas cadeias de Markov: uma para deslocamentos na coordenada x e outra para deslocamentos na coordenada y. Em cada unidade de tempo, em função do estado da cadeia, é escolhido um deslocamento na direção x e

outro na direção y .

A cadeia de Markov possui probabilidade m de mudança para os estados à direita e probabilidade m de mudança para os estados à esquerda, conseqüentemente a probabilidade de permanência no mesmo é $(1 - 2m)$. Nesse modelo é atribuído um conjunto de valores de incrementos na posição inicial do nó, que variará no intervalo $[0, n]$. Esse incremento representa a variação do valor da velocidade e segue o comportamento de uma série geométrica onde o valor inicial é 1 e o valor máximo é n . Desta forma, o modelo permite um movimento suave com diversas velocidades resultantes.

Ajustando os valores de m , e n é possível definir uma movimentação suave com pequenas variações de velocidade, representando por exemplo, o deslocamento de pessoas, bem como grandes acelerações, representando o deslocamento de veículos.

Um exemplo de um rastro de movimentação quando uma estação se desloca de acordo com o modelo MMIG pode ser encontrado na figura 2.2.

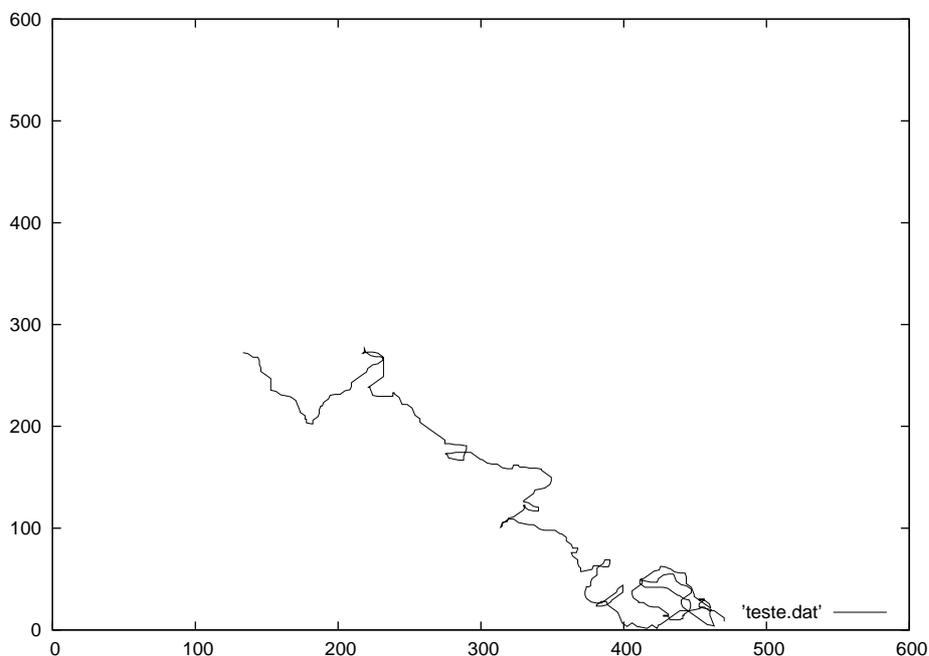


Figura 2.2: Exemplo de um rastro de movimentação de uma estação móvel quando esta se desloca de acordo com o modelo de movimentação MMIG

2.3 Perfis de Mobilidade

De acordo com [13] perfil de mobilidade pode ser definido como um conjunto de parâmetros atribuídos buscando representar um comportamento com características específicas de movimentação. Entre estas características pode-se citar: comportamento da velocidade, características relativas a direção de movimentação e intervalo de tempo de pausa.

Quanto mais perfis de movimentação um modelo possuir, a mais cenários de movimentação um modelo se adapta, sendo assim, se o modelo **A** possui mais perfis de movimentação que o modelo **B**, pode-se dizer que o modelo **A** é mais versátil que o modelo **B**. Normalmente esta flexibilidade é obtida através da inserção de alguns parâmetros de configuração ao modelo de mobilidade em questão. A contrapartida desta flexibilidade é a dificuldade de mapear o conjunto de parâmetros de configuração ao perfil de movimentação desejado.

Na Seção 2.2.4 foi dito que ajustando os parâmetros de configuração do MMIG é possível representar uma grande variedade de cenários indo desde o deslocamento de pessoas até o deslocamento de veículos. O *Smooth* também permite alguns perfis de mobilidade através da variação da probabilidade de mudança de direção, da probabilidade de mudança de velocidade, dos valores de velocidade mínima e máxima e dos valores de aceleração mínima e máxima. O modelo *Random Walk* permite apenas ajustar as velocidade mínima e máxima. Isto limita muito a aplicabilidade deste modelo. O único ajuste que o modelo RWP permite é variar o tempo de pausa e os parâmetros v_{min} e v_{max} . As distribuições estacionárias obtidas nas referências [43], [54] e [8] indicam a dependência que o comportamento do modelo tem da área de simulação. Isto acontece porque o ponto de destino é escolhido uniformemente dentro da área de simulação. Isto significa que no momento da escolha dos parâmetros do RWP deve ser levado em consideração o tamanho da área de simulação, dificultando esta escolha.

O modelo proposto nesta dissertação partiu da premissa de que é desejável a possibilidade de se caracterizar diversos cenários utilizando um modelo de mobili-

dade. Conforme será visto no Capítulo 3, o modelo proposto possui um conjunto de parâmetros que combinados resultam em perfis de movimentação. No Capítulo 4 é demonstrada a forma como as distribuições estacionárias permitem conhecer o comportamento do modelo proposto em resposta aos parâmetros de configuração. Isto facilita muito a configuração destes parâmetros sendo uma das grandes vantagens do novo modelo.

2.4 Regras de Borda

Normalmente as simulações de redes móveis *Ad Hoc* são realizadas em regiões limitadas, isto é, as estações podem se locomover apenas dentro de uma *área de simulação*. Alguns modelos de mobilidade permitem que uma estação alcance os limites da área de simulação, quando este evento ocorre deve-se definir critérios que decidam o que fazer quando uma estação móvel atinge a fronteira da área de simulação. Estes critérios são denominados *regras de borda*. As regras de borda mais encontradas na literatura são [6]: *wrap around*, *bounce* e *delete and replace*.

2.4.1 *Wrap Around*

Esta regra de borda preserva a direção e a velocidade de uma estação móvel quando este atinge a fronteira da área de simulação. O movimento é reiniciado na borda oposta à fronteira alcançada. A figura 2.3 ajuda a compreender melhor esta regra de borda.

2.4.2 *Bounce*

Esta regra de borda também conhecida como *reflection* [53] reflete a movimentação de uma estação móvel na borda da área de simulação. Seu comportamento é semelhante ao de uma bola de bilhar quando colide com a borda de uma mesa de sinuca. O módulo da velocidade não varia, apenas a componente da velocidade na

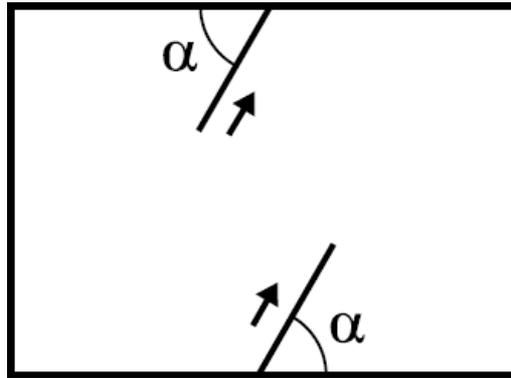


Figura 2.3: Regra de Borda *Wrap Around*

direção perpendicular à borda é invertida. A figura 2.4 ilustra esta regra de borda.

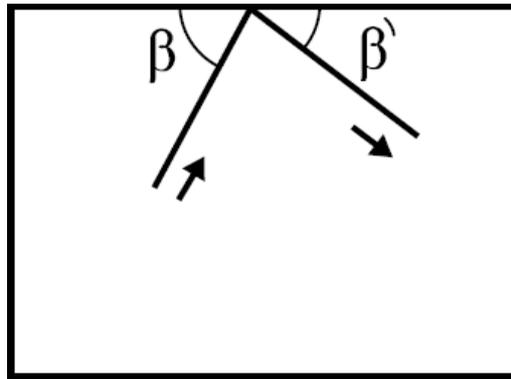


Figura 2.4: Regra de borda *bouce*

Existem também variações desta regra, onde o valor do ângulo refletido é uniformemente distribuído no intervalo $[0^\circ, 90^\circ]$ nas quinas da área de simulação e $[0^\circ, 180^\circ]$ nas outras partes da borda. O valor da nova velocidade também segue uma distribuição uniforme entre $[v_{min}, v_{max}]$. Esta regra de borda é conhecida como *modified bounce* [18].

2.4.3 *Delete and Replace*

Nesta regra quando uma estação móvel atinge a fronteira da área de simulação ela é retirada da borda e é inserida de novo, aleatoriamente, em um novo ponto dentro da área de simulação. As novas direções e velocidade de movimentação são escolhidas aleatoriamente de acordo com o modelo de mobilidade utilizado. Esta

regra busca representar cenários onde as estações móveis podem sair da área de simulação. A figura 2.5 apresenta um exemplo desta regra de borda.

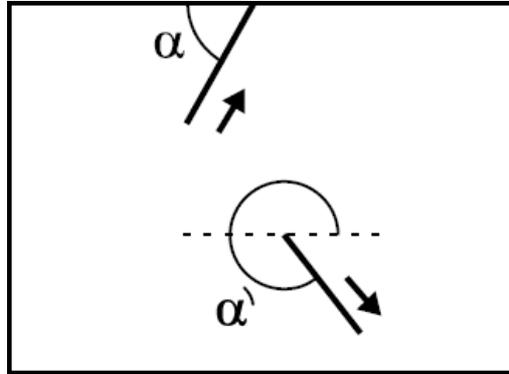


Figura 2.5: Regra de Borda *Delete and Replace*

2.4.4 Efeitos das Regras de Borda na Densidade de Estações na Área de Simulação

As simulações realizadas nas Referências [6] e [18] demonstraram que a regra de borda influencia principalmente a densidade das estações. Por este motivo é preciso ter muito cuidado com a escolha da regra de borda. Nas simulações realizadas com o *Random Walk* em [6] comprovou-se que a regra de borda *Delete and Replace* concentra as estações no centro da área de simulação. Isto pode ser explicado porque os nós que alcançam às bordas da área de simulação são removidos destas extremidades. Se a distribuição de reposição for uniformemente distribuída, vai haver uma redução do número de estações nas extremidades e uma concentração nas regiões mais centrais porque, se as estações forem repostas nos extremos a concentração se manterá a mesma, mas se elas forem repostas no meio, haverá uma estação a menos nas extremidades e uma a mais no centro. Para este modelo de mobilidade as regras de borda *Bounce* e *Wrap Around* resultaram em uma distribuição das estações uniforme dentro da área de simulação.

O MMIG foi avaliado em [18]. Como este modelo faz com que as estações tenham uma tendência de permanecer se deslocando na mesma direção, a densidade dos nós acabou sendo maior nas extremidades quando as regras de borda *Delete and Replace*

e *Bounce* são utilizadas. Novamente, quando a regra de borda *Wrap Around* é utilizada a densidade obtida é uniforme. Isto acontece porque quando a estação atinge a borda ela não muda nem a sua velocidade, nem a sua direção. É como se uma estação se deslocasse em uma área de simulação sem bordas [12] ou infinita. Se a área de simulação é infinita, é claro que a densidade de estações deve ser uniforme.

Dessa forma, se for desejável que a densidade seja mantida uniforme durante todo o tempo de simulação, pode-se garantir isto através da regra de borda *Wrap Around* [6].

2.5 Transiência dos Modelos de Mobilidade

Um processo estocástico é dito estar em regime **estacionário** se suas características estatísticas não variam com o tempo, quando o sistema se encontra neste regime, pode-se dizer que uma mudança na origem do eixo do tempo é impossível de se detectar [40]. Sendo assim pode-se postular que as amostras obtidas não dependem do instante em que foram observadas [44].

Um processo é dito ser estacionário no *sentido amplo* se a média, denominada $E[X(t)]$, é independente do tempo e a função de autocorrelação, denominada $R_X(t_1, t_2)$, depende apenas do intervalo $\tau = [t_1, t_2]$. Formalmente:

$$E[X(t)] = \text{constante} \quad (2.1)$$

e

$$R_X(t_1, t_2) = R_X(\tau) \quad \tau = t_2 - t_1 \quad (2.2)$$

Simulações estocásticas de redes de computadores, isto é, simulações com algum componente probabilístico implicando em resultados aleatórios, são consideradas *assintoticamente estacionárias* se, após decorrido um certo tempo de simulação, o sistema atingir o estado estacionário. Quando o sistema atinge este estado pode-se dizer que este não possui idade, uma vez que não é possível saber quando ocorreu o

seu início. Sendo assim, somente quando este estado é atingido os resultados obtidos não são dependentes da duração de simulação [41].

Recentes anomalias observadas na evolução do comportamento de modelos de mobilidade com o passar do tempo indicam a existência de um estado transiente que pode levar muito tempo para convergir para o estado estacionário. Entre estas anomalias pode-se citar: a redução da velocidade[75] e a concentração das estações [54] e [8] com o passar do tempo. Se o objetivo da simulação for representar o comportamento de longo prazo do sistema, o resultado final não pode ter nenhuma componente transiente.

Conforme será visto no Capítulo 5, neste trabalho é proposto um método de realização de simulações cuja distribuição inicial é idêntica a distribuição estacionária. Sendo assim, o modelo proposto não sofre nenhuma das anomalias citadas acima conforme será demonstrado na Seção 6.2

2.6 Discussão

Os modelos citados neste capítulo são ditos sintéticos, ou seja, não são baseados em registros reais de movimentação. Um modelo é um bom modelo quando o comportamento previsto é comparável (dentro de uma margem de tolerância) ao comportamento apresentado pelo sistema real. Até o limite do nosso conhecimento, não existe qualquer estudo representativo apresentando registros de movimentação reais de usuários em uma rede *Ad Hoc*, sendo assim, fazer uma afirmação sobre qual modelo de mobilidade é o melhor ainda não é possível. Por enquanto, o melhor que se pode fazer é uma comparação empregando-se métricas baseadas em características esperadas de movimentação.

Diversos artigos [12], [27], [22], [4] e [45] argumentam que um usuário móvel normalmente se desloca com uma direção em mente. Além disto as variações de velocidade não são muito abruptas [7]. Sendo assim, as velocidades e direções futuras devem ser correlacionadas com as velocidades e direções passadas. Isto quer dizer que uma estação móvel se desloca com um senso de direção e não aleatoriamente. Estes

mesmos autores argumentam que os modelos mais utilizados nos estudos científicos, o RWP e o Random Walk, não possuem nenhuma destas características.

Seguindo estas premissas em [13] na tentativa de identificar qual modelo se aproxima mais da realidade foram criadas três métricas: quantidade de mudanças bruscas de direção, número de mudanças bruscas de velocidade e quantidade de paradas abruptas na tentativa de comparar três modelos de mobilidade: o RWP, o MPA e o MMIG. Neste estudo, a partir destas três métricas, comprovou-se que o MMIG apresenta um desempenho superior aos modelos RWP e MPA por apresentar menos mudanças bruscas de direção, menos mudanças bruscas de velocidade e menor quantidade de paradas abruptas.

Os resultados apresentados em [13] são um grande incentivo à adoção de modelos de mobilidade Markovianos. Por este motivo, nesta dissertação, ao invés de continuar na busca por modelos mais próximos da realidade, optou-se por aprofundar a pesquisa sobre modelos de mobilidade Markovianos, com o intuito de compreender qual é o impacto destes nas avaliações de desempenho de redes *Ad Hoc*. O primeiro passo nesta direção seria obter as distribuições estacionárias do MMIG. No entanto, a solução de cadeias de Markov com muitos estados, como é caso da cadeia de Markov que rege o deslocamento do MMIG, só é possível através de métodos numéricos [25].

Sendo assim, a obtenção das distribuições estacionárias analíticas no Capítulo 4 só foi possível a partir da criação de um novo modelo de mobilidade que apresenta as mesmas características do MMIG mas com estruturas especiais que permitem a solução da cadeia de Markov mesmo quando o número de estados for muito grande. A forma como isto foi possível, resultando na proposta de um novo modelo, será apresentada no próximo capítulo.

Capítulo 3

Modelo de Mobilidade Proposto

“Toda a nossa ciência, comparada com a realidade, é primitiva e infantil e, no entanto, é a coisa mais preciosa que temos” - Albert Einstein

COM base nas observações feitas nas seções anteriores, e seguindo a premissa de que os nós devem se mover com um senso de direção e não aleatoriamente [12], foi proposto um modelo Markoviano de mobilidade de parâmetro contínuo. De modo semelhante ao MMIG, o senso de direção de um nó que se desloca de acordo com o modelo proposto é devido a memória contida nos estados da cadeia de Markov.

A dificuldade em se obter as distribuições estacionárias do MMIG é decorrente principalmente do fato de haver muitas probabilidades de transições entre estados. Normalmente, se a cadeia de Markov não apresenta nenhuma estrutura especial que permite simplificar os sistemas de equações lineares complexos, a solução de cadeias de Markov com muitos estados só é possível através de métodos numéricos como a fatoração LU, o método de eliminação de Gauss ou o método iterativo de Gauss-Siedel [25].

A solução adotada no modelo proposto foi permitir apenas transições entre estados adjacentes. Desta forma, o novo modelo [19] é baseado em um processo estocástico de nascimento e morte que é uma classe especial de cadeia de Markov muito importante utilizada para modelar mudanças no tamanho de uma população

e que teve um papel fundamental no desenvolvimento da teoria de filas [34]. Talvez este processo também tenha um papel fundamental na descrição de movimentação de indivíduos.

No modelo, a velocidade é governada pela cadeia de Markov. Como a velocidade é uma grandeza vetorial, a distribuição de probabilidade de direção de movimentação dos nós também é um processo estocástico Markoviano, logo, os nós se movimentam com uma tendência de permanecer na mesma direção ou em direções próximas.

3.1 Descrição do modelo

O modelo usa uma cadeia de Markov de parâmetro contínuo para governar o movimento na direção x e outra na direção y . As transições ocorrem independentemente em cada uma das cadeias. A probabilidade de no instante t a estação móvel se deslocar a uma velocidade v é denotada simplificada como:

$$P_v(t) \triangleq P[V(t) = v] \quad (3.1)$$

A velocidade resultante é a soma vetorial das duas cadeias conforme a equação (3.2)¹:

$$\vec{V} = V_x \vec{i} + V_y \vec{j} \quad (3.2)$$

onde V_x é a componente da velocidade na direção \vec{x} e V_y é a componente da velocidade na direção \vec{y} . Desta forma o módulo da velocidade é dado por (3.3):

$$|\vec{V}| = \sqrt{V_x^2 + V_y^2} \quad (3.3)$$

e a direção de movimentação é dada por (3.4):

¹No sistema de coordenadas retangulares (x,y) os símbolos especiais \vec{i} e \vec{j} são usados para os vetores unitários nas direções x e y; ou seja, $\vec{i} = (1,0)$ e $\vec{j} = (0,1)$.

$$\theta = \arctan\left(\frac{V_y}{V_x}\right) \quad (3.4)$$

O deslocamento na direção \vec{x} no intervalo de tempo Δt é dado por 3.5:

$$\Delta x = V_x \Delta t \quad (3.5)$$

Similarmente o deslocamento na direção \vec{y} no intervalo de tempo Δt é dado por (3.6):

$$\Delta y = V_y \Delta t \quad (3.6)$$

Para representar os possíveis valores de velocidade são definidos os parâmetros b , V_{max} , $|V_{max}^{\vec{}}|$ e N .

- $b \rightarrow$ é a base do número que representa a velocidade da Estação Móvel.
- $\lambda \rightarrow$ é a taxa de aumento de velocidade do modelo proposto.
- $\mu \rightarrow$ é a taxa de redução de velocidade do modelo proposto.
- $N \rightarrow$ é o número de estados entre a velocidade zero (repouso) e a velocidade máxima.

A equação que relaciona os estados com a velocidade em uma direção é (3.7):

$$V = s \cdot b^n \quad 0 \leq n \leq N \quad n \in \mathbb{Z} \quad e \quad s = \pm 1; \quad (3.7)$$

s é um parâmetro auxiliar que vale 1 quando o movimento é no sentido positivo da coordenada cartesiana e -1 quando o deslocamento é no sentido negativo.

Quando o estado da cadeia x é n e o estado da cadeia y é m , o módulo da velocidade resultante é dado por (3.8) e a direção deste vetor vale (3.9):

$$|\vec{V}| = \sqrt{b^n + b^m} \quad (3.8)$$

$$\theta = \operatorname{arctg}\left(\frac{b^m}{b^n}\right) \quad (3.9)$$

Uma vez definida a base e N, a velocidade máxima em uma direção é dada por (3.10):

$$V_{max} = b^N \quad (3.10)$$

Substituindo-se (3.10) em (3.3) pode-se obter o módulo da velocidade máxima:

$$|V_{max}^{\vec{}}| = \sqrt{2}V_{max} \quad (3.11)$$

Substituindo-se (3.11) em (3.10) e tirando o logaritmo na base b, pode-se obter o valor de N em função de b e $|V_{max}^{\vec{}}|$ conforme a equação (3.12):

$$N = \log_b\left(\frac{|V_{max}^{\vec{}}|}{\sqrt{2}}\right) \quad (3.12)$$

Valores negativos de V significam que a estação móvel se desloca no sentido negativo em determinada direção. Como a velocidade em cada direção varia entre $v_{max} = b^N$ e $-v_{max} = -b^N$, percebe-se que a cadeia tem $(2N + 1)^2$ estados.

Dado que o estado da cadeia é b^n a taxa com que sua velocidade aumenta é λ e a taxa com que sua velocidade diminui é μ . Como o sistema é Markoviano, a probabilidade do sistema permanecer no estado n é função apenas do estado atual e é independente de quanto tempo o sistema está neste estado. Por isto diz-se que a distribuição do tempo remanescente em um determinado estado é sem memória [34]. Em tempo contínuo a única variável aleatória com esta propriedade é a exponencial. Portanto o tempo em que uma estação permanece se movendo a uma determinada velocidade é uma variável aleatória exponencialmente distribuída com média $\frac{1}{\lambda + \mu}$. Desta forma a taxa com que a estação muda de velocidade, em uma determinada direção, é dada por $\lambda + \mu$.

Quando a componente de velocidade é máxima, o único evento que pode acontecer é uma redução da velocidade. Este evento ocorre com uma taxa μ . Se a componente for zero, a estação só pode aumentar sua velocidade. Desta forma no estado especial zero a taxa com a qual a estação sai deste estado é 2λ . O diagrama de transição de estados representado na figura 3.1 auxilia a compreender melhor o comportamento do modelo de mobilidade.

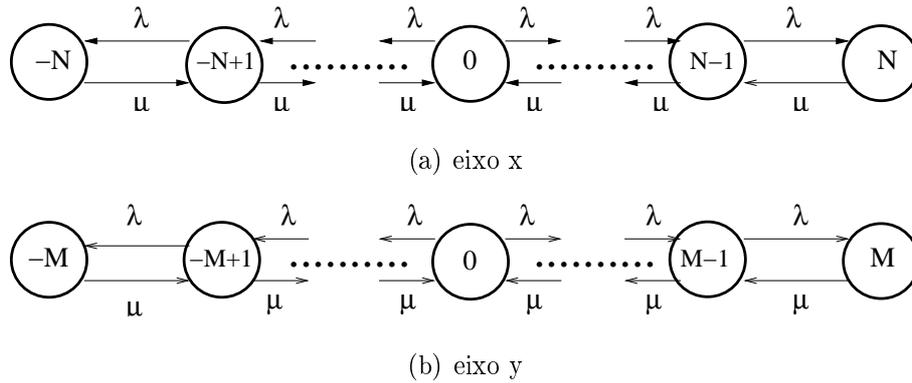


Figura 3.1: Cadeias de Markov governando a movimentação: (a)no eixo x, (b)no eixo y

As transições são permitidas apenas entre as velocidades vizinhas $v-1$, v e $v+1$. O diagrama de transição de estados representado na figura 3.2 ilustra o funcionamento do modelo.

Para analisarmos a velocidade resultante, basta notar que esta é a soma vetorial das velocidades governadas independentemente pelas duas cadeias conforme (3.2). Portanto a fração do tempo em que a velocidade foi $\vec{V} = b^n \vec{i} + b^m \vec{j}$ é dada pela fração do tempo em que a cadeia x esteve no estado n multiplicado pela fração do tempo em que a cadeia y esteve no estado m. Esta igualdade está descrita na equação (3.13).

$$P_v = P[V_x = b^n]P[V_y = b^m] \quad \text{tal que} \quad v = \sqrt{b^n + b^m} \quad (3.13)$$

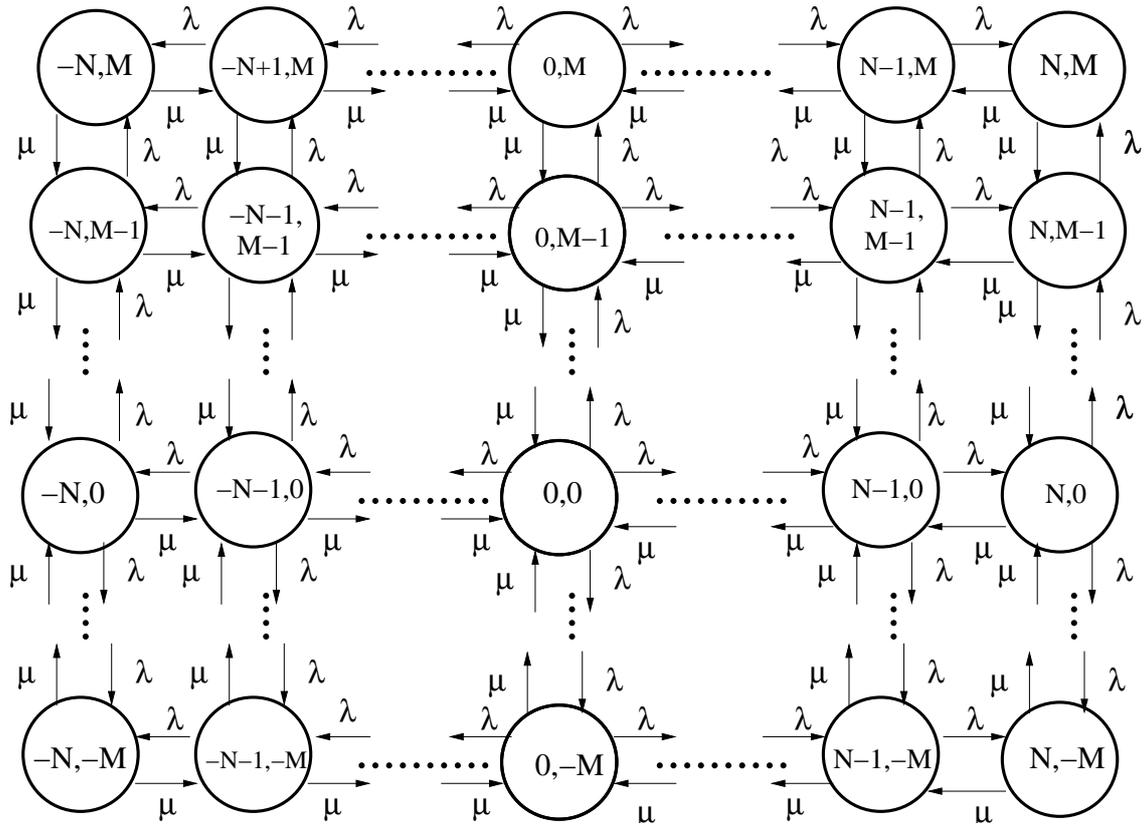


Figura 3.2: Diagrama de estados com duas variáveis de estado

3.2 Perfis de Mobilidade

Conforme definido na Seção 2.3, o perfil de mobilidade é caracterizado por uma combinação de valores atribuídos aos parâmetros do modelo. Esta seção tem por objetivo mostrar como os diversos perfis de movimentação que o modelo proposto é capaz de representar.

A combinação de diferentes valores de λ , μ , b e N resultam em diversos perfis de mobilidade. Os exemplos a seguir ilustram alguns dos possíveis perfis que o modelo é capaz de representar. A figura 3.2 contém um *trace* de movimentação com os seguintes parâmetros de configuração: $b = 4$, $N = 1$, $\lambda = 0.02$ e $\mu = 0.02$. O *trace* da figura 3.4 é obtido através dos seguintes parâmetros de configuração: $b = 1.25$, $N = 4$, $\lambda = 0.01$ e $\mu = 0.01$. A figura 3.2 é um exemplo de um *trace* de movimentação quando $b = 1.25$, $N = 2$, $\lambda = 0.01$ e $\mu = 0.01$.

Estes são três exemplos que ilustram a gama de perfis de movimentação que

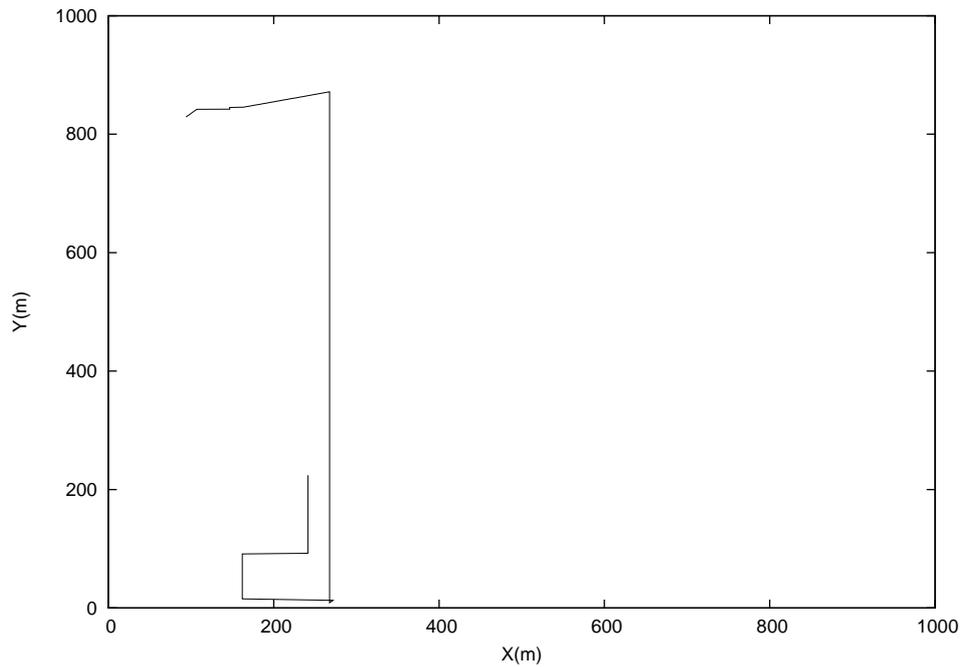


Figura 3.3: Exemplo 1: $b = 4$, $N = 1$, $\lambda = 0.02$ e $\mu = 0.02$

o modelo é capaz de representar. Pode parecer difícil entender como o perfil de movimentação é influenciado pelos parâmetros de configuração. Conforme será visto na Seção 6.4 as distribuições estacionárias mostram como a cadeia de Markov varia em função de seus parâmetros λ , μ e N . Se o movimento de uma estação móvel for governada por esta cadeia de Markov, conseqüentemente o comportamento de movimentação será influenciado pelos parâmetros λ , μ e N da mesma forma que a cadeia de Markov. Este assunto voltará a ser abordado na Seção 6.4 quando serão apresentados exemplos de escolha dos parâmetros de configuração a partir das distribuições estacionárias.

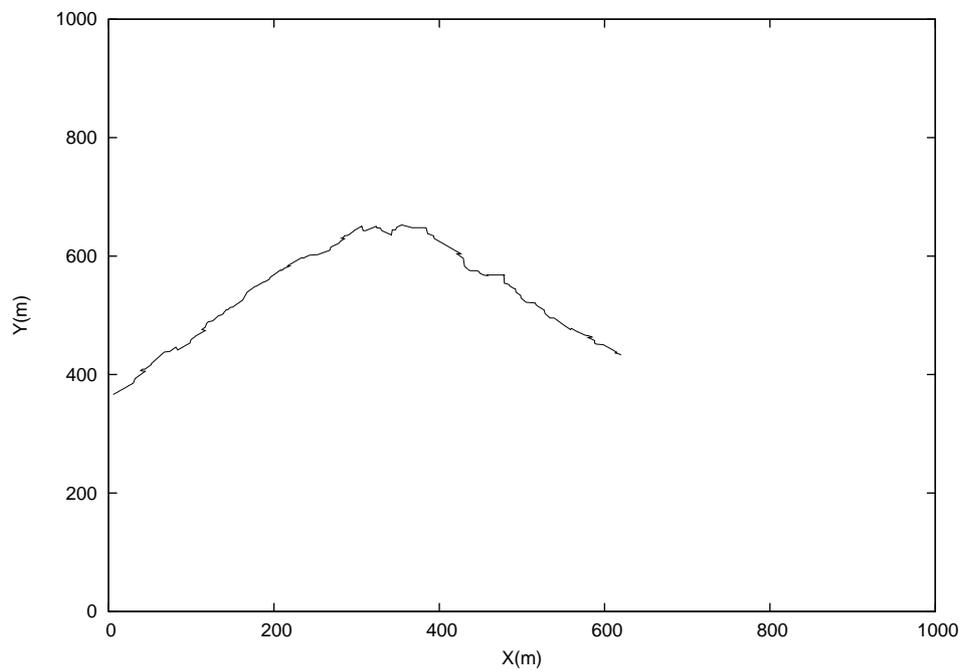


Figura 3.4: Exemplo 2: $b = 1.25$, $N = 4$, $\lambda = 0.01$ e $\mu = 0.01$

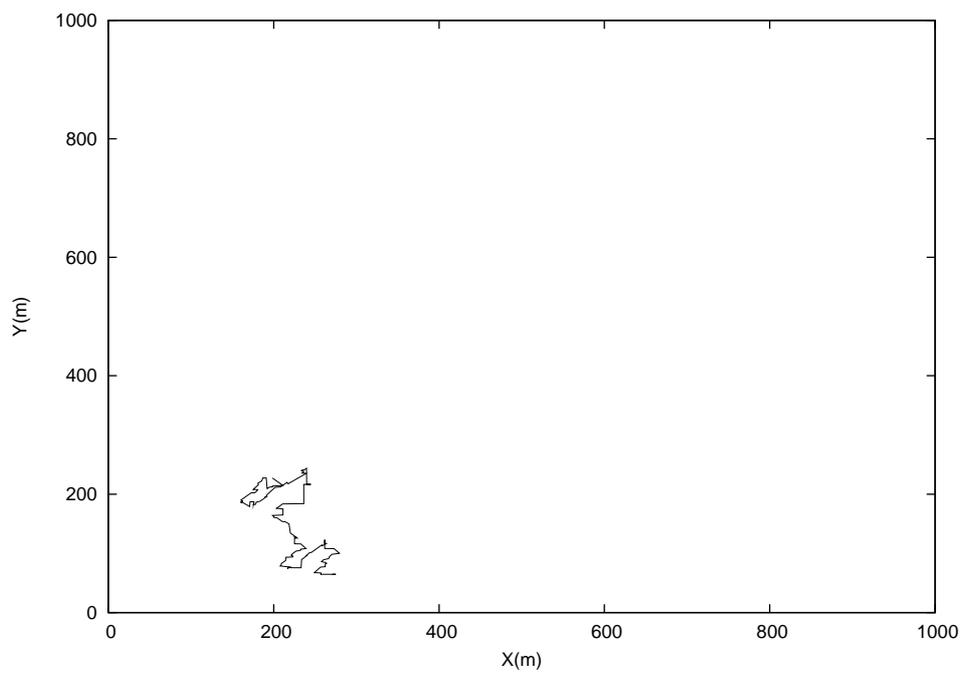


Figura 3.5: Exemplo 3: $b = 1.25$, $N = 2$, $\lambda = 0.01$ e $\mu = 0.01$

Capítulo 4

Distribuições Estacionárias

“Até mesmo um relógio parado está certo duas vezes ao dia” - Woody

Allen

ESTE capítulo apresenta as distribuições estacionárias do modelo proposto. Conforme será visto na Seção 6.4 as fórmulas derivadas neste capítulo ajudaram a escolher os parâmetros de configuração do modelo além de serem o ponto de partida para a metodologia de realização de simulações perfeitas apresentada no Capítulo 5.

4.1 Análise Estacionária da Distribuição da Velocidade

O objetivo desta seção é descobrir a probabilidade da velocidade assumir um valor v em regime estacionário, ou seja, determinar qual é a fração do tempo em que a velocidade da estação móvel foi igual a um valor v dado por $\sqrt{s.b^n + s.b^m}$ conforme definido na equação (3.8).

A obtenção destas distribuições estacionárias tem duas finalidades principais: Auxiliar na escolha dos parâmetros de entrada do modelo de forma a representar corretamente o perfil de mobilidade desejado e possibilitar a realização de simulações

de mobilidade iniciadas em regime permanente. Isto é possível porque uma vez que conhecida as distribuições estacionárias, é possível fazer com que a distribuição inicial dos sistema seja igual a distribuição estacionária. Desta forma a convergência do estado inicial para o estado estacionário é imediata [54].

4.1.1 Movimento Unidimensional

Para a obtenção das distribuições estacionárias a cadeia de Markov foi decomposta em duas: Uma descrevendo a movimentação no eixo x e a outra no eixo y. O vetor de deslocamento resultante é a combinação linear do deslocamento em cada um dos dois eixos. A partir das definições realizadas no capítulo anterior pode-se chegar ao seguinte resultado:

Teorema 1 *Assumindo que uma estação se desloque de acordo com o modelo proposto, a distribuição estacionária da cadeia de Markov que governa a velocidade em apenas uma única direção é dada por:*

$$P_n = \rho^{N-|n|} \frac{1-\rho}{2-\rho^N-\rho^{N+1}} \quad -N \leq n \leq N \quad (4.1)$$

para $-N \leq n \leq N$ e 0 caso contrário.

Prova:

Assumindo que as taxas de mudança de estados são constantes, para se resolver a cadeia de Markov no estado estacionário deve-se resolver as equações de equilíbrio do sistema. Uma vez que o sistema atingiu o equilíbrio, o número de vezes que o sistema entrou no estado n é igual ao número de vezes que o sistema saiu do estado n [34]. A probabilidade do sistema sair do estado n, é igual a probabilidade do sistema estar no estado n, vezes a taxa com a qual ele sai do estado n. Desta forma:

$$\begin{aligned} p_n \mu &= p_{n-1} \lambda \quad \text{se} \quad n = -N \text{ ou } n = N; \\ (\lambda + \mu) p_n &= \lambda p_{n-1} + \mu p_{n+1} \quad \text{se} \quad -N < n < N \quad n \in \mathbb{Z}; \end{aligned} \quad (4.2)$$

Começando a analisar o sistema da direita para a esquerda (começando a partir do estado N).

$$p_N \mu = p_{N-1} \lambda \quad (4.3)$$

$$p_{N-1} = \left(\frac{\mu}{\lambda} \right) p_N \quad (4.4)$$

Analisando o estado $N - 1$

$$(\lambda + \mu)p_{N-1} = \lambda p_{N-2} + \mu p_N \quad (4.5)$$

Substituindo-se (4.4) em (4.5):

$$p_{N-2} = \left(\frac{\mu}{\lambda} \right)^2 p_N \quad (4.6)$$

Examinando-se (4.6) observa-se que a solução para $0 \leq n \leq N$ é do tipo:

$$p_n = \left(\frac{\mu}{\lambda} \right)^{N-n} p_N \quad 0 \leq n \leq N \quad (4.7)$$

Resolvendo as equações de equilíbrio para o estado especial $n=0$:

$$\mu p_{-1} + \mu p_1 = 2\lambda p_0 \quad (4.8)$$

Substituindo a equação (4.7) para $n=0$ e $n=1$ em (4.8):

$$\mu \left(\frac{\mu}{\lambda} \right)^{N-1} p_N + \mu p_{-1} = 2\lambda \left(\frac{\mu}{\lambda} \right)^N p_N \quad (4.9)$$

Reescrevendo o lado direito da equação:

$$\mu p_{-1} = 2\mu \left(\frac{\mu}{\lambda} \right)^{N-1} p_N - \mu \left(\frac{\mu}{\lambda} \right)^{N-1} p_N \quad (4.10)$$

Dividindo o lado direito por μ :

$$p_{-1} = \left(\frac{\mu}{\lambda}\right)^{N-1} p_N = p_1 \quad (4.11)$$

A partir da equação (4.11) observa-se uma simetria uma vez que $p_1 = p_{-1}$. Esta simetria vale para todos os estados. Desta forma é possível obter a fórmula geral dada por (4.12):

$$p_n = \left(\frac{\mu}{\lambda}\right)^{N-|n|} p_N \quad -N \leq n \leq N \quad (4.12)$$

Finalmente, para encontrarmos as probabilidades no estado estacionário, deve-se lembrar que a soma das probabilidades de se estar em qualquer um dos estado da cadeia é 1. Portanto:

$$\sum_{n=-N}^N p_n = 1 \quad (4.13)$$

Substituindo (4.12) em (4.13) e fazendo valer a simetria:

$$2 \sum_{n=1}^N \left(\frac{\mu}{\lambda}\right)^{N-n} p_N + \left(\frac{\mu}{\lambda}\right)^N p_N = 1 \quad (4.14)$$

Como:

$$\sum_{n=1}^N \left(\frac{\mu}{\lambda}\right)^{N-n} = \sum_{n=0}^{N-1} \left(\frac{\mu}{\lambda}\right)^n = \frac{1 - \left(\frac{\mu}{\lambda}\right)^N}{1 - \frac{\mu}{\lambda}} \quad (4.15)$$

Substituindo-se (4.15) em (4.14):

$$P_N \left[2 \left(\frac{1 - \left(\frac{\mu}{\lambda}\right)^N}{1 - \frac{\mu}{\lambda}} \right) + \left(\frac{\mu}{\lambda}\right)^N \right] = 1 \quad (4.16)$$

Após algumas manipulações algébricas:

$$P_N = \frac{1 - \frac{\mu}{\lambda}}{2 - \left(\frac{\mu}{\lambda}\right)^N - \left(\frac{\mu}{\lambda}\right)^{N+1}} \quad (4.17)$$

Finalmente substituindo-se (4.17) em (4.12):

$$P_n = \left(\frac{\mu}{\lambda}\right)^{N-|n|} \frac{1 - \frac{\mu}{\lambda}}{2 - \left(\frac{\mu}{\lambda}\right)^N - \left(\frac{\mu}{\lambda}\right)^{N+1}} \quad -N \leq n \leq N \quad (4.18)$$

Para facilitar a análise é definida uma nova variável:

$$\rho = \left(\frac{\mu}{\lambda}\right) \quad (4.19)$$

Substituindo-se (4.18) em (4.19) tem-se:

$$P_n = \rho^{N-|n|} \frac{1 - \rho}{2 - \rho^N - \rho^{N+1}} \quad -N \leq n \leq N \quad (4.20)$$

As figuras 4.1, 4.2 e 4.3 representam o gráfico da função (4.20) quando ρ é igual a 0.5, 1.5 e 1 respectivamente. Nestes exemplos n varia entre -4 e 4. É importante perceber que este gráfico é função apenas da razão entre μ e λ . Isto significa que quando este modelo de mobilidade é empregado, a velocidade em que uma estação se move não depende das intensidades de μ e λ apenas da razão entre eles.

4.1.2 Movimento Bidimensional

A partir do teorema 1 e com o auxílio da equação (3.13) pode-se formular o seguinte resultado:

Teorema 2 *A distribuição estacionária da cadeia de Markov $P[V = v]$ que governa a velocidade de uma estação que se desloca no plano \mathbb{R}^2 de acordo com o modelo definido no capítulo 3 é:*

$$P[V = v] = (\rho)^{2N-|n|-|m|} \left(\frac{1 - \rho}{2 - \rho^N - \rho^{N+1}} \right)^2 \quad (4.21)$$

para $-N \leq n \leq N$ e 0 caso contrário e $n \in \mathbb{N}$.

Prova:

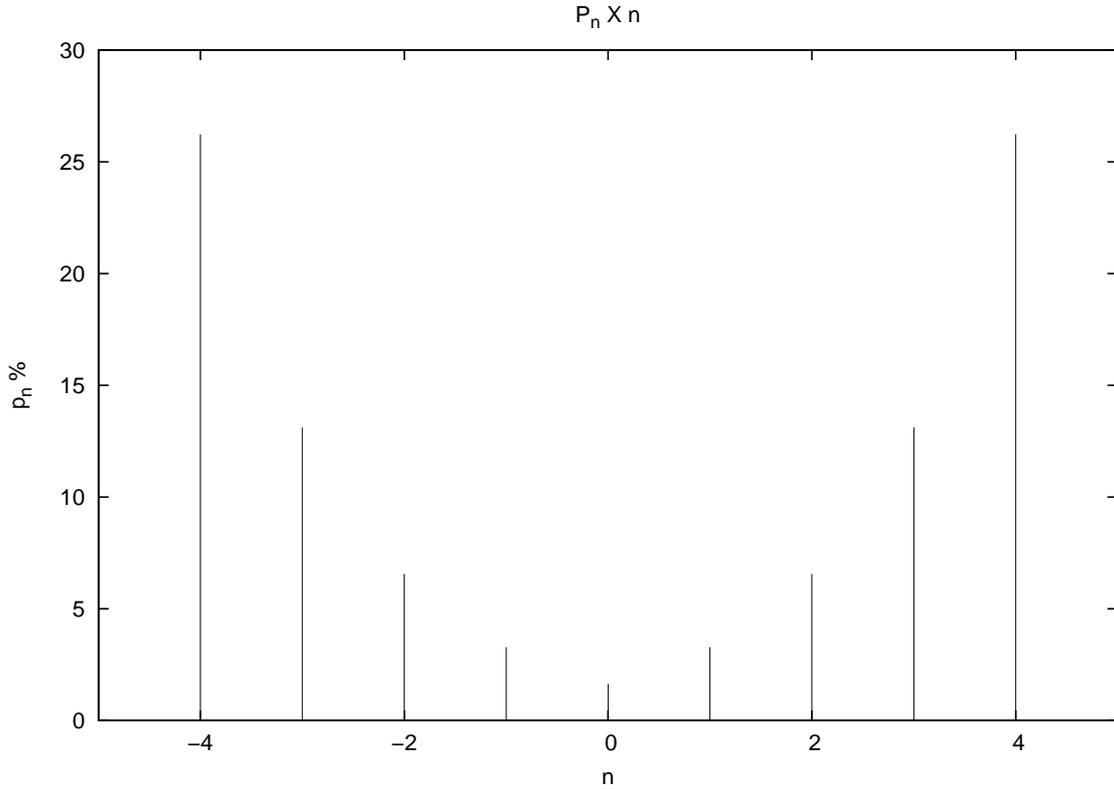


Figura 4.1: Variação de $P_n(\%)$ em função de n ($\rho = 0.5$)

Substituindo-se (4.18) em (3.13):

$$P[V = v] = \left(\frac{\mu}{\lambda}\right)^{N-|n|} \frac{1 - \frac{\mu}{\lambda}}{2 - \left(\frac{\mu}{\lambda}\right)^N - \left(\frac{\mu}{\lambda}\right)^{N+1}} \times \left(\frac{\mu}{\lambda}\right)^{N-|m|} \frac{1 - \frac{\mu}{\lambda}}{2 - \left(\frac{\mu}{\lambda}\right)^N - \left(\frac{\mu}{\lambda}\right)^{N+1}} \quad (4.22)$$

Simplificando:

$$P[V = v] = \left(\frac{\mu}{\lambda}\right)^{2N-|n|-|m|} \left(\frac{1 - \frac{\mu}{\lambda}}{2 - \left(\frac{\mu}{\lambda}\right)^N - \left(\frac{\mu}{\lambda}\right)^{N+1}}\right)^2 \quad (4.23)$$

Substituindo (4.19) em (4.23):

$$P[V = v] = (\rho)^{2N-|n|-|m|} \left(\frac{1 - \rho}{2 - \rho^N - \rho^{N+1}}\right)^2 \quad -N \leq n \leq N \quad (4.24)$$

O gráfico da equação (4.24) está representado nas figuras 4.4, 4.5 e 4.6 onde em cada figura ρ vale 0.5, 1.5 e 1 respectivamente. Em todos os casos o intervalo de

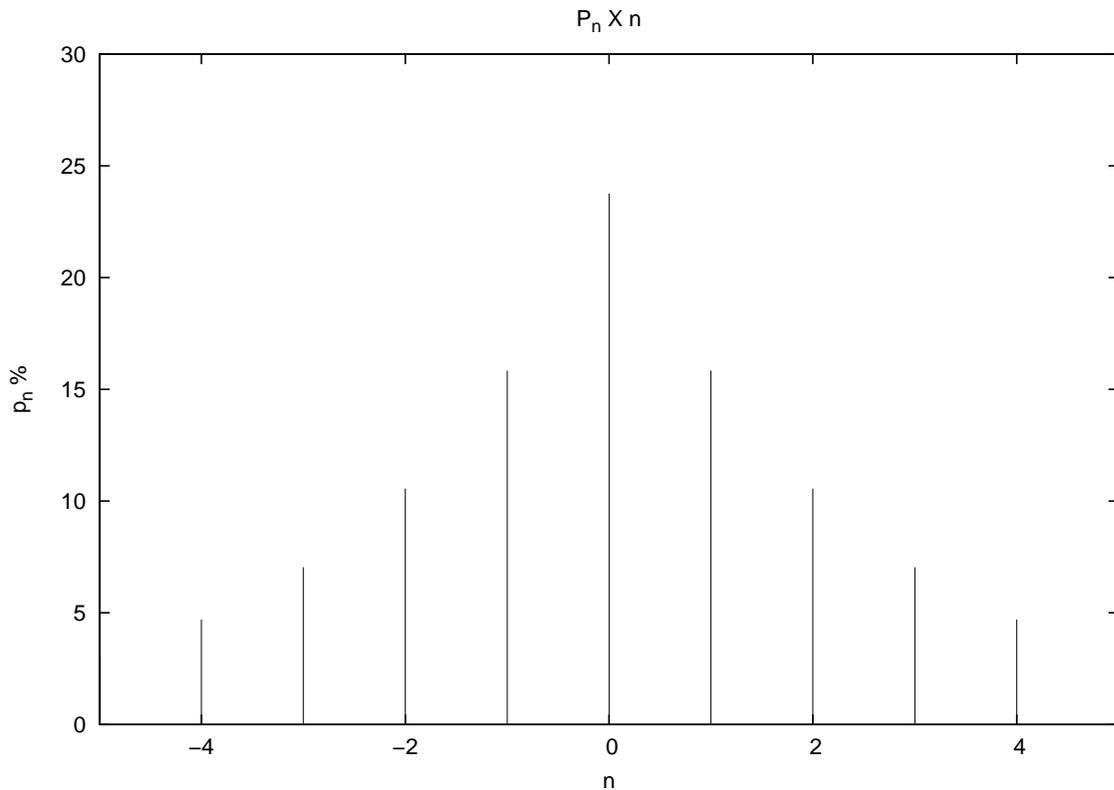


Figura 4.2: Variação de P_n (%) em função de n ($\rho = 1.5$)

variação de n é entre -4 e 4.

O gráfico 4.7(a) ilustra a fração do tempo em que uma estação fica em repouso, em função de ρ . Para valores próximos de 0, a taxa de saída do estado 0 é muito maior que a taxa de chegada neste estado, desta forma o tempo em que uma estação fica parada é mínimo. A medida que a razão $(\frac{\mu}{\lambda})$ aumenta a taxa de chegada ao estado 0 aumenta. Conseqüentemente aumenta também o tempo de pausa. Estes gráficos estão parametrizados em função do número de estados da cadeia. Para cada curva N vale 2, 4 ou 8.

O gráfico 4.7 (b) é muito semelhante, só que ilustra a probabilidade de uma estação se deslocar na sua velocidade máxima. Este gráfico é o extremo oposto da figura (a). A medida que ρ diminui maior é a chance do sistema ir para as extremidades da cadeia fazendo com que a estação se mova com uma velocidade maior.

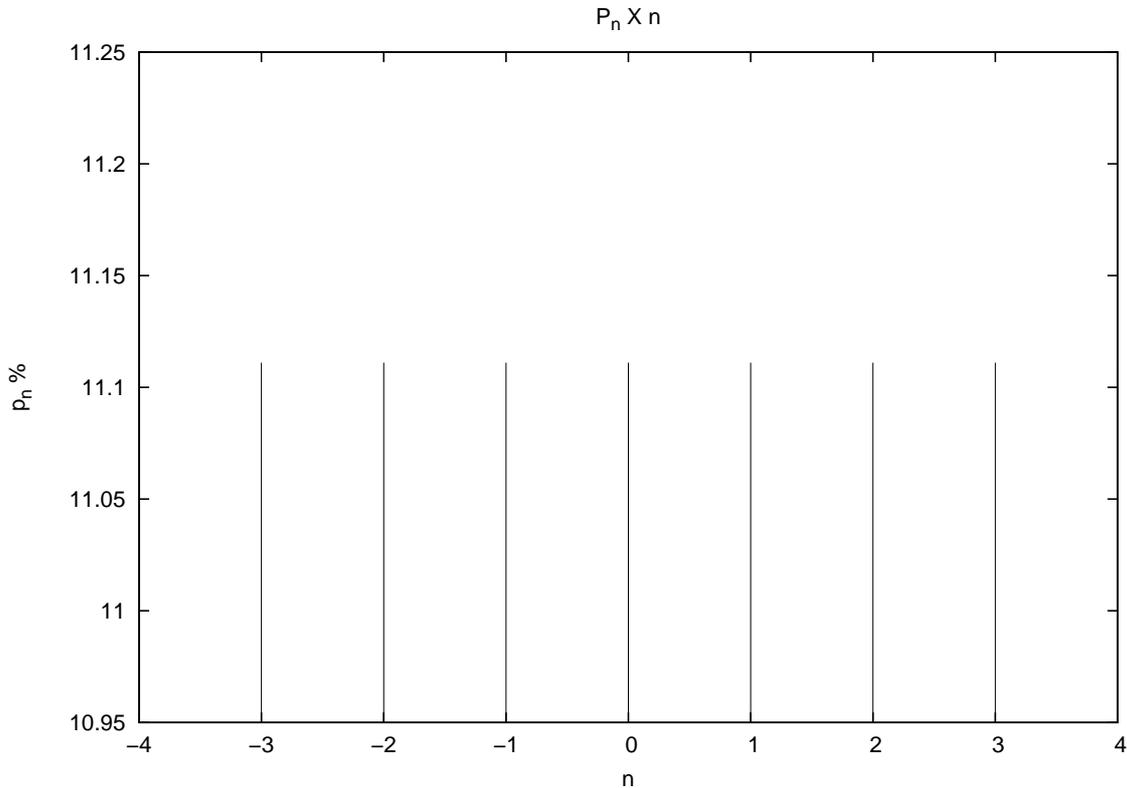


Figura 4.3: Variação de $P_n(\%)$ em função de n ($\rho = 1$)

4.2 Análise Estacionária da Distribuição da Direção

No modelo proposto a direção de movimentação em dado instante de tempo é obtida a partir dos estados m e n conforme a equação (3.4). Com base nesta equação e notando-se a existência de vetores proporcionais, a probabilidade do ângulo de movimentação Θ ser igual a θ em determinado instante de tempo t é :

$$P(\Theta = \theta) = \sum_m \sum_n P(V_x = b^m)P(V_y = b^n) \quad \text{tal que } \theta = \text{tg}\left(\frac{b^n}{b^m}\right) \quad (4.25)$$

Seja T uma variável aleatória que conta o número de mudanças de direção de movimentação de uma EM que se desloca de acordo com o modelo de mobilidade proposto. Uma vez que o tempo que a cadeia passa em determinado estado é exponencial, o número de mudanças de transição em um intervalo de tempo t , é uma variável aleatória que segue uma distribuição de Poisson com média 4λ , se a

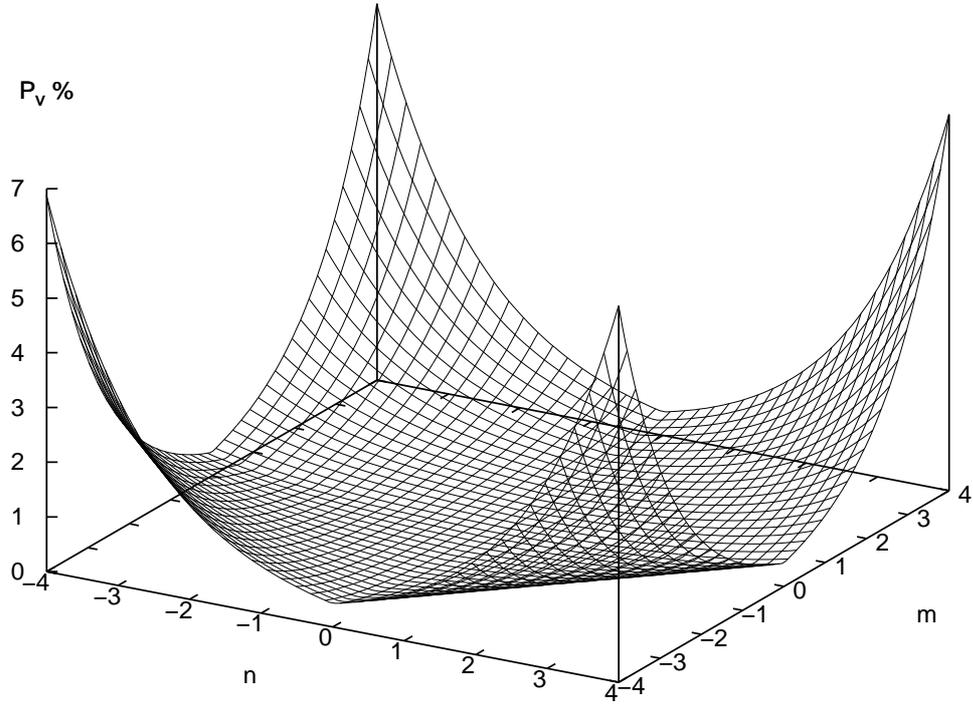


Figura 4.4: Variação de $P_v(\%)$ em função de n e m ($\rho = 0.5$)

EM está em repouso, $3\lambda + \mu$ se deslocamento é apenas na direção x ou y e não ocorre na velocidade máxima, $2\lambda + \mu$ se a velocidade é máxima em uma única direção, 2μ se a cadeia está nos estados extremos e $2(\lambda + \mu)$ caso contrário. Então, aproveitando a simetria da cadeia e com o auxílio da equação (4.18) é possível formular o seguinte resultado para a distribuição de K :

$$\begin{aligned}
 P(K = k) &= \frac{(4\lambda)^k e^{-4\lambda t}}{k!} P_0^2 + 2 \frac{(3\lambda + \mu)^k e^{-(2\lambda t + \mu)}}{k!} P_0 P_{n=0, m \neq 0, \neq M} + \\
 &+ 4 \frac{(2\lambda + \mu)^k e^{-(2\lambda + \mu)t}}{k!} P_{n=N, m \neq N} + 4 \frac{(2\mu)^k e^{-2\mu t}}{k!} P_N^2 + \\
 &+ \frac{(2(\lambda + \mu))^k e^{-2(\lambda + \mu)t}}{k!} \left(\sum_{m=-N-1, \neq 0}^{N-1} \sum_{n=-N-1, \neq 0}^{N-1} P_{xi} P_{yj} \right) \quad (4.26)
 \end{aligned}$$

Como a soma de todas as probabilidades é sempre 1:

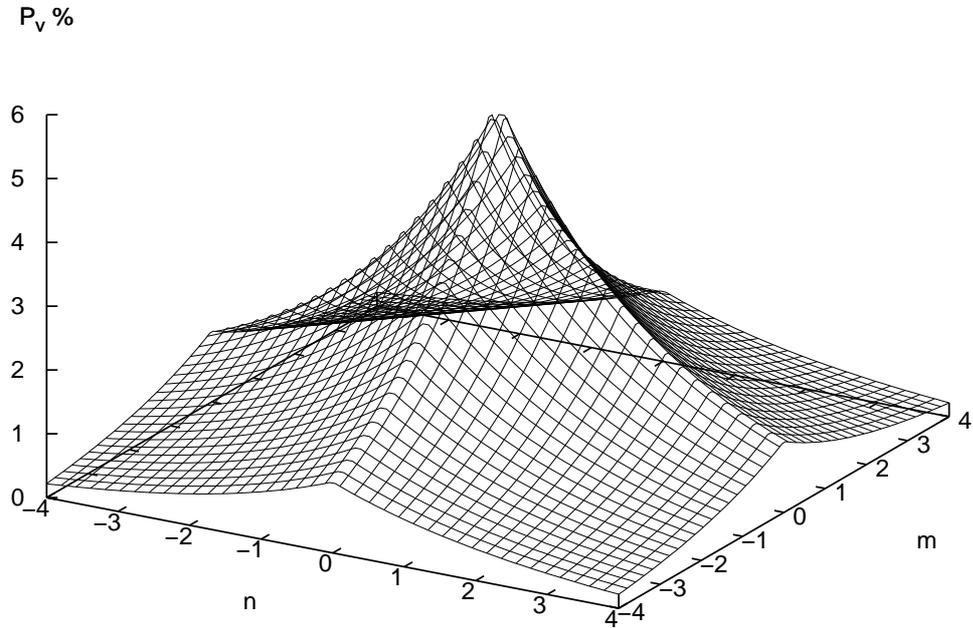


Figura 4.5: Variação de $P_v(\%)$ em função de n e m ($\rho = 1.5$)

$$\begin{aligned}
 P(K = k) &= \frac{(4\lambda)^k e^{-4\lambda t}}{k!} P_0^2 + 2 \frac{(3\lambda + \mu)^k e^{-(2\lambda t + \mu)}}{k!} (P_0)(1 - P_0 - P_N) + \\
 &+ 4 \frac{(2\lambda + \mu)^k e^{-(2\lambda + \mu)t}}{k!} (P_N)(1 - P_N) + 4 \frac{(2\mu)^k e^{-2\mu t}}{k!} P_N^2 + \\
 &+ \frac{\{2(\lambda + \mu)\}^k e^{-2(\lambda + \mu)t}}{k!} [1 - (P_0 + P_N - P_0 P_N)] \quad (4.27)
 \end{aligned}$$

De modo semelhante, T é uma variável aleatória que representa o tempo que uma estação passa sem mudar a sua direção. A distribuição de probabilidade cumulativa de T é:

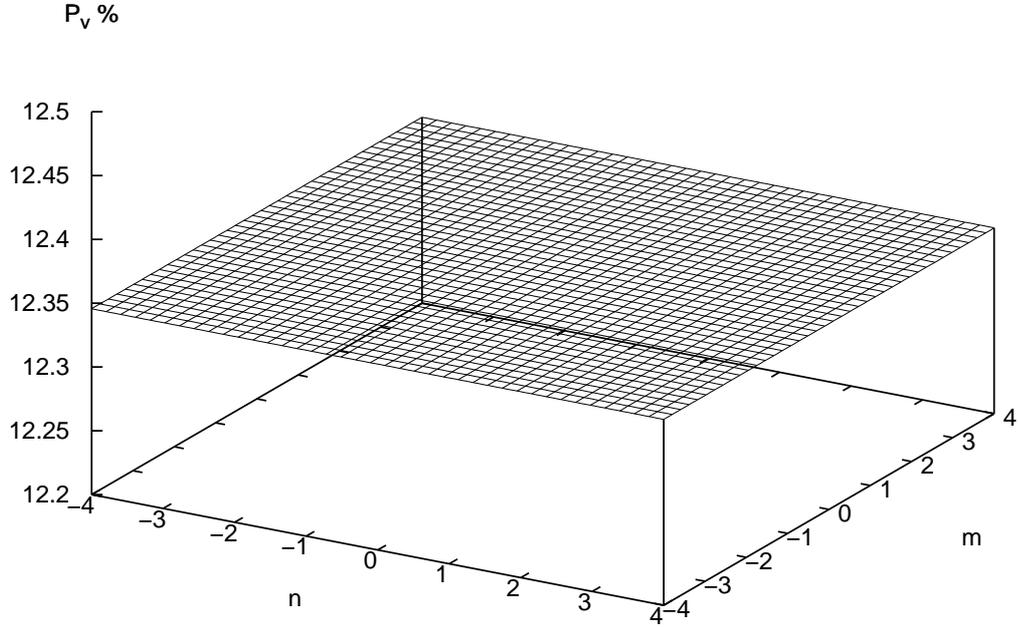


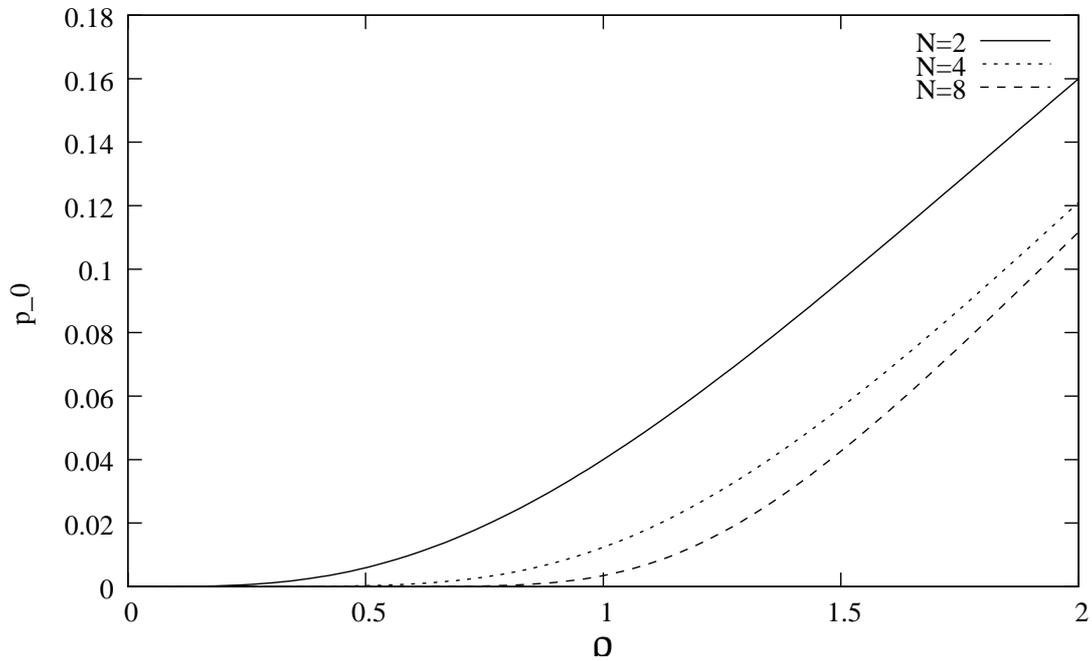
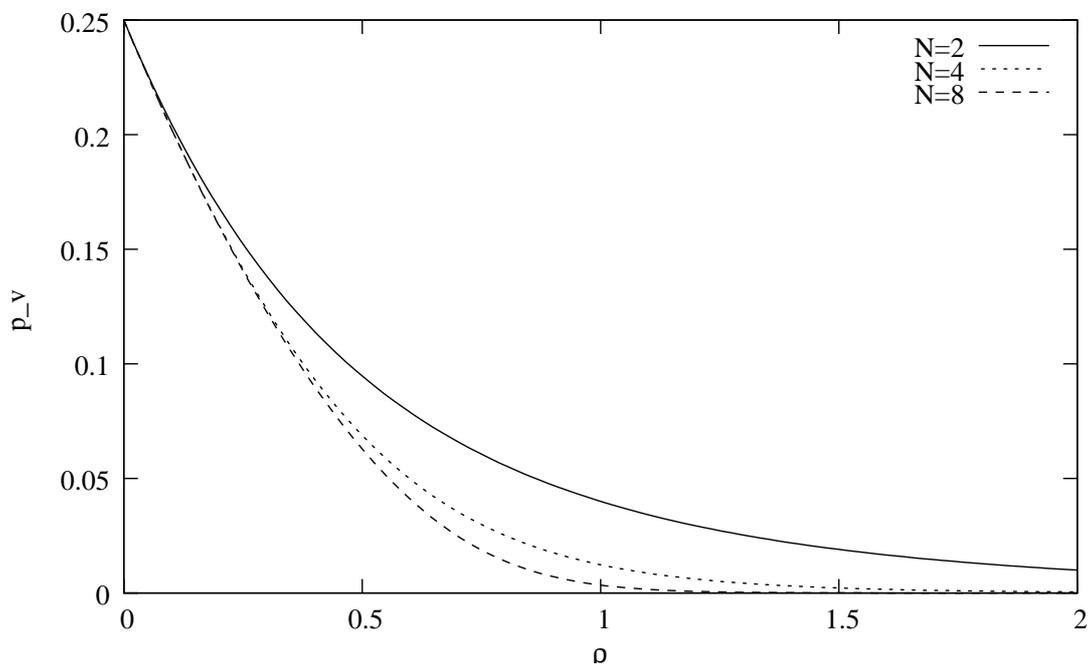
Figura 4.6: Variação de $P_v(\%)$ em função de n e m ($\rho = 1$)

$$F_T(t) = P(T \leq t) = \begin{cases} 1 - e^{-4\lambda t} & \text{se } n = m = 0 \\ 1 - e^{-(3\lambda + \mu)t} & \text{se } n = 0 \text{ e } m \neq 0, \neq N \text{ ou } m = 0 \text{ e } n \neq 0, \neq N \\ 1 - e^{-(2\lambda + \mu)t} & \text{se } n = \pm N \text{ e } m \neq \pm N \text{ ou se } m = \pm N \text{ e } n \neq \pm N \\ 1 - e^{-2\mu t} & \text{se } n = m = \pm N \text{ ou se } n = -m = \pm N \\ 1 - e^{-2(\lambda + \mu)t} & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (4.28)$$

A distribuição da velocidade é função apenas da razão entre as taxas μ e λ . Não podemos dizer o mesmo do ângulo de movimentação. A partir da equação (4.28), percebe-se que a distribuição cumulativa de probabilidade de não haver uma mudança de direção é diretamente proporcional às taxas λ e μ . Quanto maior forem os valores das taxas de transição menor é o intervalo de permanência no mesmo

estado da cadeia.

A figura 4.8 mostra a densidade cumulativa do tempo de pausa de uma estação que se move de acordo com o modelo. A figura 4.9 ilustra a distribuição cumulativa de probabilidade de permanência na mesma direção (a) quando a velocidade é máxima (b) nos demais estados intermediários em função do tempo. Pode-se perceber que a taxa de mudança de direção nos estados intermediários é maior do que nos estado extremos ou no estado central, no entanto, o tempo de permanência nos estados intermediários não é tão sensível à variação das taxas quanto nos estados extremos.

(a) $n=0$ (b) $n=N$ Figura 4.7: Variação da probabilidade de se estar: (a) em repouso (b) na velocidade máxima em função de ρ

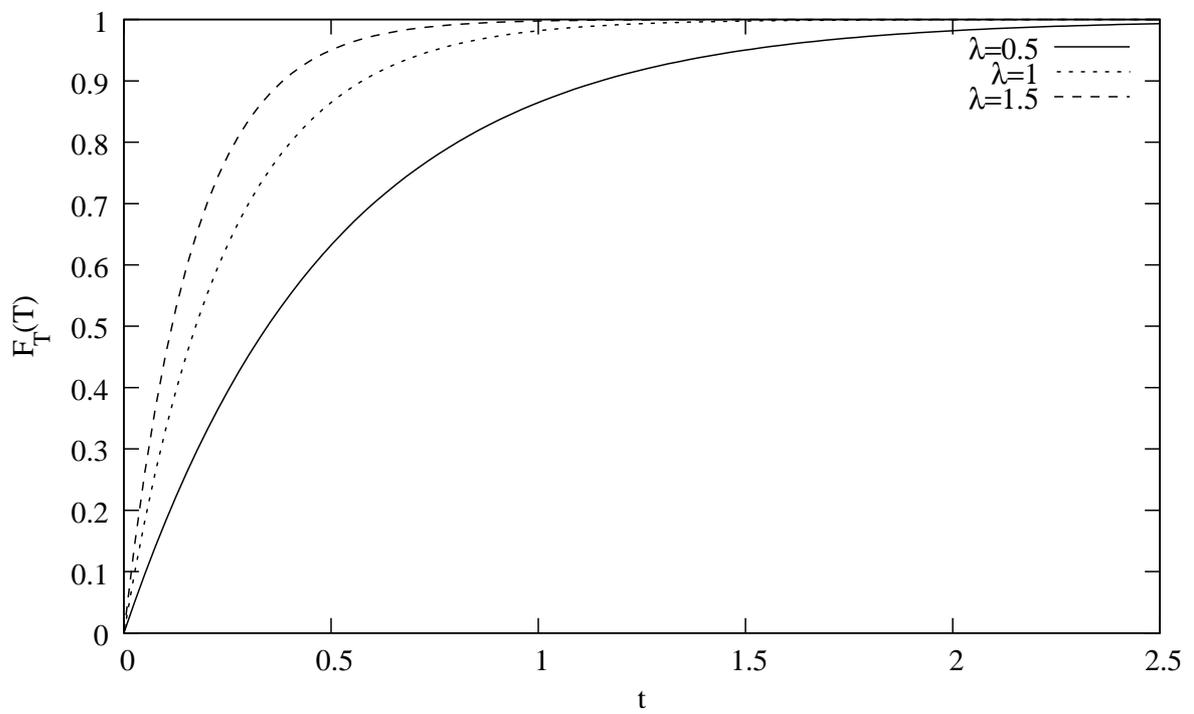


Figura 4.8: Distribuição cumulativa da probabilidade do tempo de pausa ser menor que t

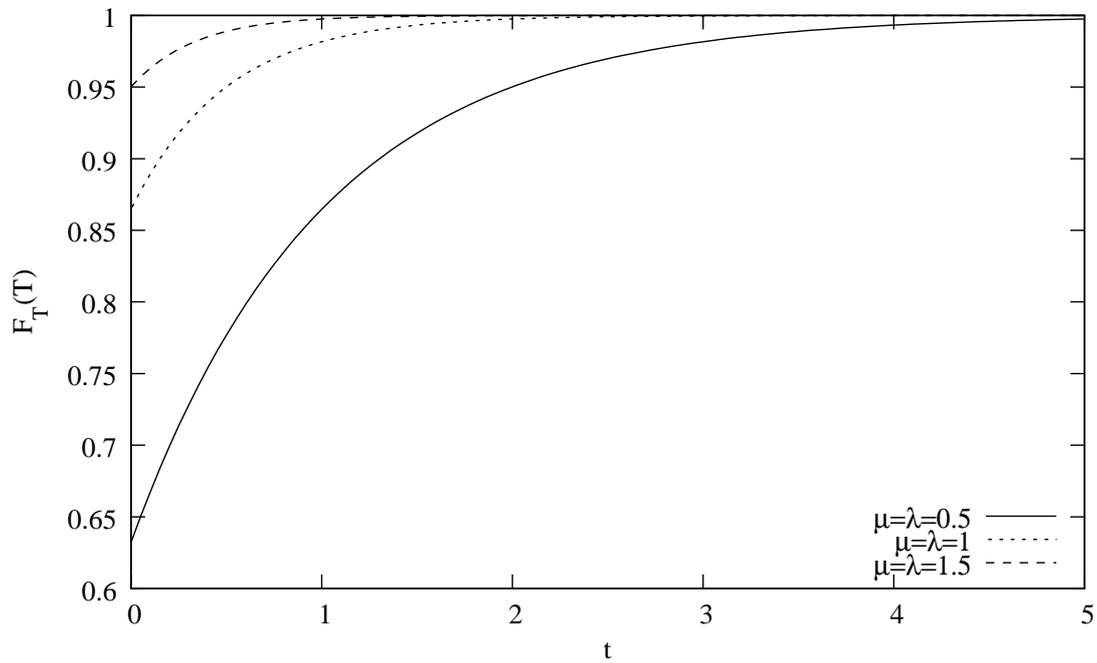
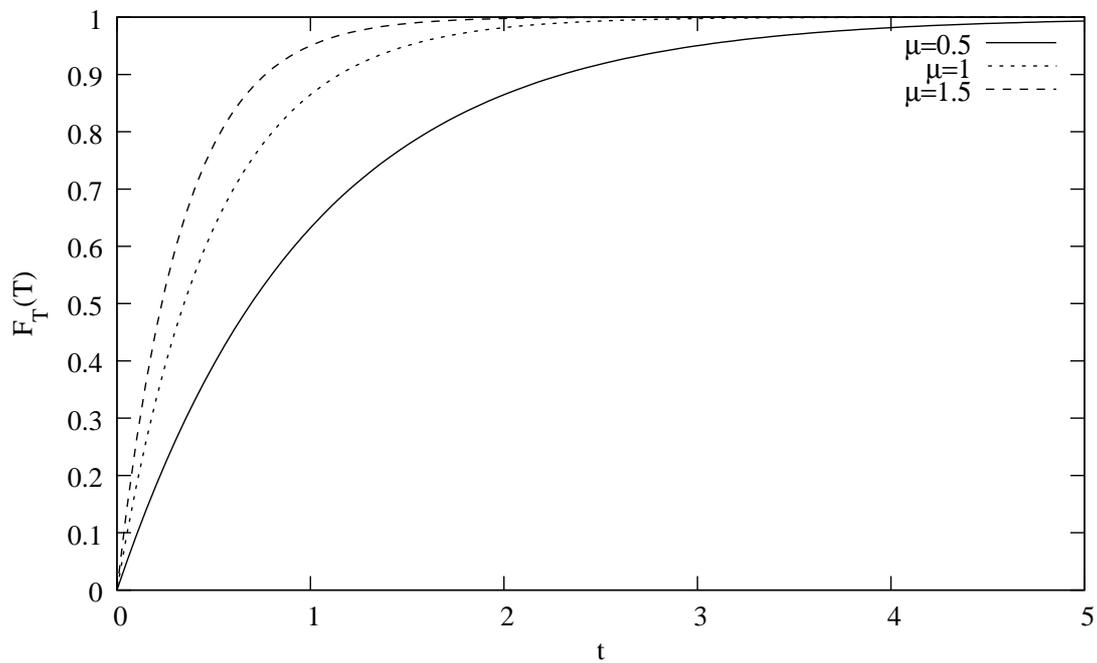
(a) $n=N$ (b) $n=n$

Figura 4.9: Distribuição cumulativa da probabilidade de não haver mudança de direção quando a estação está (a) na velocidade máxima (b) nas velocidades intermediárias em função do tempo

Capítulo 5

Simulações Perfeitas

“Se você não procura perfeição, você nunca alcançará excelência.” -

Don Shula

ESTE capítulo apresenta o método aplicado nesta dissertação para a realização de simulações perfeitas, isto é, simulações cujo resultado final não apresenta nenhuma componente transiente. Conforme discutido na Seção 2.5 e será demonstrado na Seção 6.2, o comportamento do modelo proposto na fase transiente é diferente do comportamento em regime estacionário. A não ser que seja o objetivo do pesquisador realizar uma análise transiente de um sistema, o resultado final de uma avaliação não deve conter nenhuma componente transiente, porque quando isto acontece, os resultados são difíceis de se reproduzir e podem ser tendenciosos [43].

5.1 Métodos de Remoção da Fase Transiente

Geralmente apenas o desempenho do sistema durante sua fase estacionária é de interesse do pesquisador. Nestes casos, o período inicial (transiente) não deve ser levado em consideração nos resultados obtidos. De acordo com [12] existe os seguintes métodos para a remoção dos dados provenientes da fase transiente:

- Deixar a simulação rodar por um período muito grande

- Remoção dos dados iniciais
- Inicialização apropriada

As duas primeiras opções desperdiçam muitos recursos computacionais, além de oferecerem ainda o risco do período do gerador de números pseudo-aleatórios ser pequeno em relação ao tempo de simulação introduzindo correlações nos resultados simulados [62]. Em [12] os autores sugerem o descarte dos primeiros 1000 segundos de simulação para que o problema da inicialização seja resolvido. A maior dificuldade destes métodos consiste na impossibilidade de se determinar exatamente quais são as componentes transientes e quando esta fase termina [30], por exemplo em [54], os autores demonstram que 1000 segundos pode não ser um tempo grande o suficiente para o sistema atingir o estado estacionário. Por estes motivos estes métodos são ineficientes e não são totalmente confiáveis.

O terceiro método consiste escolher uma inicialização apropriada isto é, iniciar a simulação em um estado próximo de estado estacionário. Em alguns casos é possível iniciar a simulação imediatamente no estado estacionário. Le Boudec e Vojnovic em [43] chamaram de *Simulação Perfeita* uma simulação inicializada desta forma.

A figura 5.1 (a) ilustra o exemplo de como a velocidade média do RWP varia em função do tempo. Este resultado é a visualização do que foi comentado na Seção 2.2.1. Pode-se observar que a velocidade média diminuiu consideravelmente com a evolução do tempo. Esta diferença também é observada na métrica **Número Médio de Estações dentro do Raio de Alcance**. Esta métrica é dada pelo número médio de estações dentro do raio de alcance de cada estação e está representada na figura 5.1(b). Conforme será visto na Seção 6.2.1 estas são duas das métricas que permitem avaliar as propriedades de conectividade entre os nós a partir de uma análise topológica. Se estas métricas variam com o tempo, a conectividade também varia. Esta variação é consequência da existência de uma fase transiente que não pode estar presente nos resultados finais e deverá ser removida de algum modo.

Em ambos os resultados obtidos, a velocidade foi escolhida uniformemente no intervalo (0.1;2)m/s. A área de simulação é de 1000 X 1000. Foram plotados valores

médios, amostrados de 10 em 10 segundos.

5.2 Método de Realização de Simulações Perfeitas

Simulações perfeitas para o modelo *Random Waypoint* foram obtidas por Navidi e Camp em [54] sob a hipótese de que a posição e a velocidade são independentes no estado estacionário. Le Boudec e Vojnovic em [43] usaram fórmulas derivadas do *Palm Calculus* [42] e [41] para a obtenção das distribuições estacionárias.

Para um sistema Markoviano, conhecer *à priori* as distribuições em regime estacionário do sistema é suficiente para a realização de simulações perfeitas. Se o estado inicial da cadeia de Markov for escolhido aleatoriamente de acordo com esta distribuição estacionária, a simulação já é iniciada em regime estacionário [41].

Sendo assim, o primeiro passo para a realização de simulações perfeitas com o modelo proposto foi o cálculo das distribuições estacionárias obtidas no Capítulo 4. O próximo passo consiste em implementar um algoritmo para gerar uma amostra aleatória X distribuída de acordo com a distribuição estacionária do modelo. Na literatura existem dois métodos bastante difundidos [26] [25]: o método da inversão e o método da rejeição. O método da inversão é empregado quando é possível inverter uma função de distribuição. Quando isto não for possível, deve-se usar o método da rejeição. O algoritmo deste modelo está descrito no algoritmo 1 e pode ser aplicado se forem satisfeitas três condições:

1. $f_x(x)$ é conhecida;
2. A densidade $f_x(x)$ é > 0 apenas no intervalo $[a, b]$; e
3. $f_x(x) \leq M$ para algum valor de M

A prova deste método pode ser obtida na referência [25], mas devido a relevância que este resultado tem sobre esta dissertação a prova pode ser encontrada a seguir.

Prova:

Algoritmo 1 Método da Rejeição

-
- 1: Gere um Número aleatório X uniformemente distribuído no intervalo [a,b]
 - 2: Independentemente gere um Número aleatório Y uniformemente distribuído no intervalo [0,M].
 - 3: **se** $Y \leq f_x(X)$ **então**
 - 4: Aceite o Número escolhido X
 - 5: **senão**
 - 6: Rejeite o Número escolhido X
 - 7: Volte para o passo 1
 - 8: **fim se**
-

- A densidade de X é dada por :

$$\frac{1}{b-a} \text{ para } a \leq x \leq b$$

- A densidade de Y é igual a:

$$\frac{1}{M} \text{ para } 0 \leq Y \leq M$$

- A densidade conjunta de (X,Y) vale:

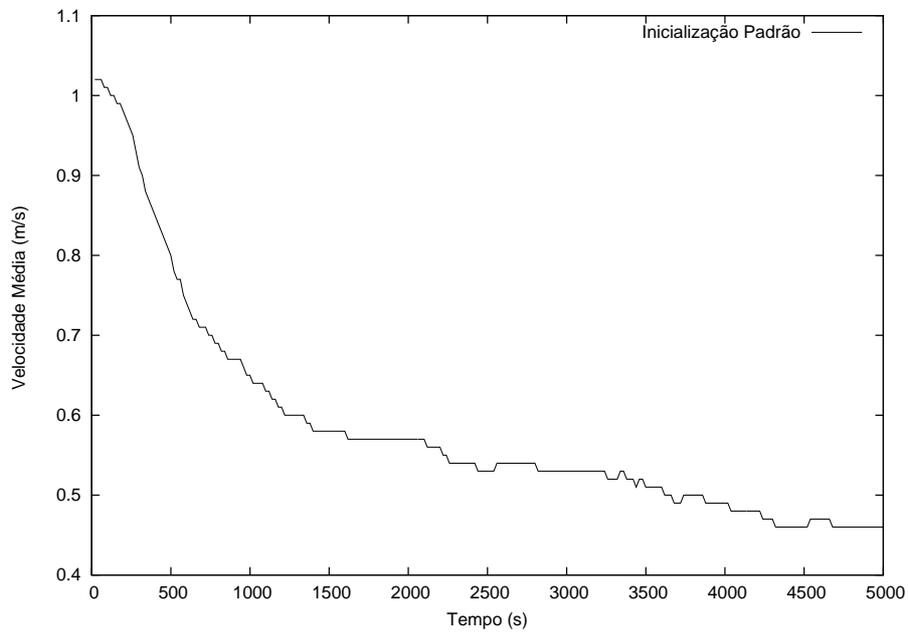
$$\frac{1}{M(b-a)} \quad 0 \leq Y \leq M, \quad 0 \leq X \leq b$$

$$P(x \leq X \leq x + dx | Y \leq f_X(x)) = P(x \leq X \leq x + dx, Y \leq f_X(x))$$

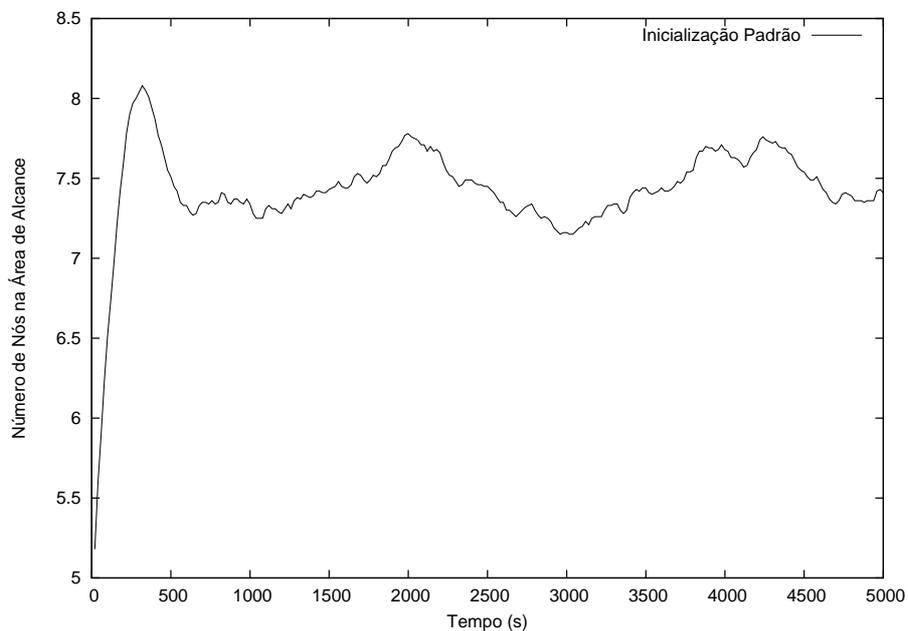
$$= \left(\frac{dx}{b-a} \right) \left(\frac{f_X(x)}{M} \right) \left(\frac{1}{M(b-a)} \right)^{-1} = f_X(x) dx$$

O método da rejeição pode ser aplicado na realização de simulações perfeitas porque as três condições necessárias são satisfeitas. O conhecimento das distribuições estacionárias no Capítulo 4 satisfaz a 1 condição; como os resultados obtidos são probabilidades e a cadeia de Markov que rege o deslocamento do modelo tem um número finito de estados a condição 2 também é satisfeita. A condição 3 é satisfeita porque toda a probabilidade é menor ou igual a 1.

A eficácia deste método de remoção de fase transiente, ou de realização de simulações perfeitas, será avaliada na Seção 6.2, quando o comportamento do modelo proposto sem o método de simulações perfeitas é confrontado com o comportamento do modelo proposto com o método de simulações perfeitas. A necessidade de simulações perfeitas será comprovada se houver uma grande diferença entre os dois comportamentos e o comportamento do modelo proposto com o método de simulações perfeitas será igual ao comportamento em regime estacionário.



(a) evolução da velocidade do RWP com o tempo



(b) evolução do número médio de estações dentro do Raio de Alcance com o tempo

Figura 5.1: Evolução do comportamento do RWP com o tempo: (a) Velocidade, (b) Número médio de contatos

Capítulo 6

Resultados Numéricos

“O que os homens de fato querem não é o conhecimento, mas a certeza.” - Bertrand Russel

NESTE capítulo são apresentados os resultados da avaliação do modelo proposto no Capítulo 3 com o objetivo de motivar o uso deste novo modelo de mobilidade. Na Seção 6.1 a implementação do modelo proposto é validada quando confrontada com os resultados obtidos via modelagem analítica realizada no Capítulo 4.

A metodologia de realização de simulações sem fase transiente também é avaliada na Seção 6.2 onde é analisada a forma como determinadas métricas evoluem com o tempo. Os resultados demonstram uma grande diferença entre o comportamento durante a fase transiente e o comportamento em regime estacionário confirmando os resultados obtidos em [60]. Conforme será visto, estes resultados se revelaram um forte argumento a favor da realização de simulações perfeitas.

Na Seção 6.3 o modelo de mobilidade proposto é avaliado comparativamente com outros três modelos de mobilidade: o MMIG, o RWP clássico e o RWP com simulação perfeita na tentativa de saber qual modelo de mobilidade é o mais realista. Na Seção 6.4 são apresentados exemplos de escolha dos parâmetros de configuração a partir das distribuições estacionárias mostrando como os parâmetros de configuração do modelo influenciam o perfil de movimentação de uma estação móvel permitindo

um melhor ajuste dos mesmos.

Finalmente na Seção 6.5 é descrita uma avaliação de desempenho do protocolo de roteamento AODV quando o modelo proposto é utilizado.

6.1 Validação da Implementação

De forma a validar a implementação do modelo proposto nesta seção, a distribuição analítica da velocidade obtida no Capítulo 4 é confrontada com a distribuição empírica de velocidade obtida a partir dos *traces* gerados pela implementação do modelo proposto.

6.1.1 Cenário das Simulações

Estas simulações foram feitas com 100 nós se deslocando em uma área de tamanho 1000×1000 . Conforme discutido no Capítulo 4 a distribuição de velocidade é função apenas da razão ρ entre os parâmetros μ e λ , ou seja, a velocidade em que uma estação se move não depende das intensidades de μ e λ apenas da razão entre eles. Sendo assim, é importante avaliar como a velocidade varia em função do parâmetro ρ . Nesta validação foram usados 3 valores para esta razão: $\rho = 0.5, 1, 1.5$. O parâmetro n vale 3 resultando em uma cadeia de Markov com $2^{2n+1} = 49$ estados.

A cadeia de Markov que rege o comportamento do modelo proposto varia independentemente da área de simulação. Desta forma as equações de balanço utilizadas no Capítulo 4 são válidas apenas para áreas de simulação sem fronteiras ou infinitas. Como na prática os simuladores necessitam que uma área de simulação seja fornecida como parâmetro, é necessário que uma regra de borda seja utilizada. Nas simulações realizadas nesta dissertação, optou-se pela regra de borda *Wrap Around* porque, conforme comentado na Seção 2.4, esta regra de borda é adequada para a representar áreas de simulação sem bordas. Portanto, utilizar esta regra de borda foi a única forma encontrada de validar as distribuições derivadas no Capítulo 4.

6.1.2 Resultados

O gráfico 6.1 apresenta o resultado quando $\rho = 1$. Pode-se perceber que, tal qual a modelagem analítica previu, a velocidade neste caso é uniformemente distribuída entre todos os estados da cadeia. Os resultados apresentados no gráfico 6.2 também confirmaram o que a modelagem analítica previu. Quando ρ é menor do que 1 a estação passa a maior parte do tempo se deslocando velocidades baixas (velocidades próximas de zero).

Quando ρ é maior do que 1, a estação passa se deslocando a velocidades altas na maior parte do tempo, isto pode ser visualizado no gráfico 6.3. Neste gráfico percebe-se novamente que os resultados obtidos via simulações e os valores analíticos estão bem próximos. Estes 3 gráficos ilustram a grande semelhança entre os resultados analíticos e os resultados simulados, o que comprova não só o funcionamento da ferramenta desenvolvida mas também valida a modelagem analítica.

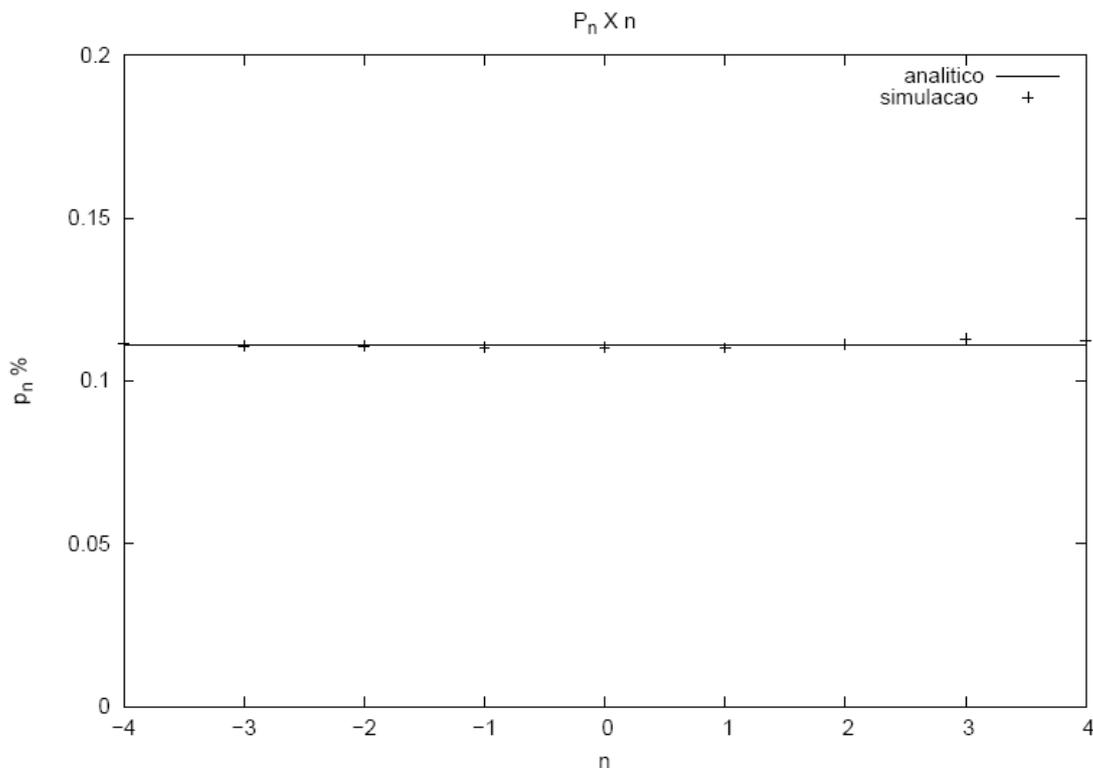


Figura 6.1: Validação da Implementação quando $\rho = 1$: Confrontação dos resultados previstos pela modelagem analítica (linha cheia) com os pontos obtidos via simulação.

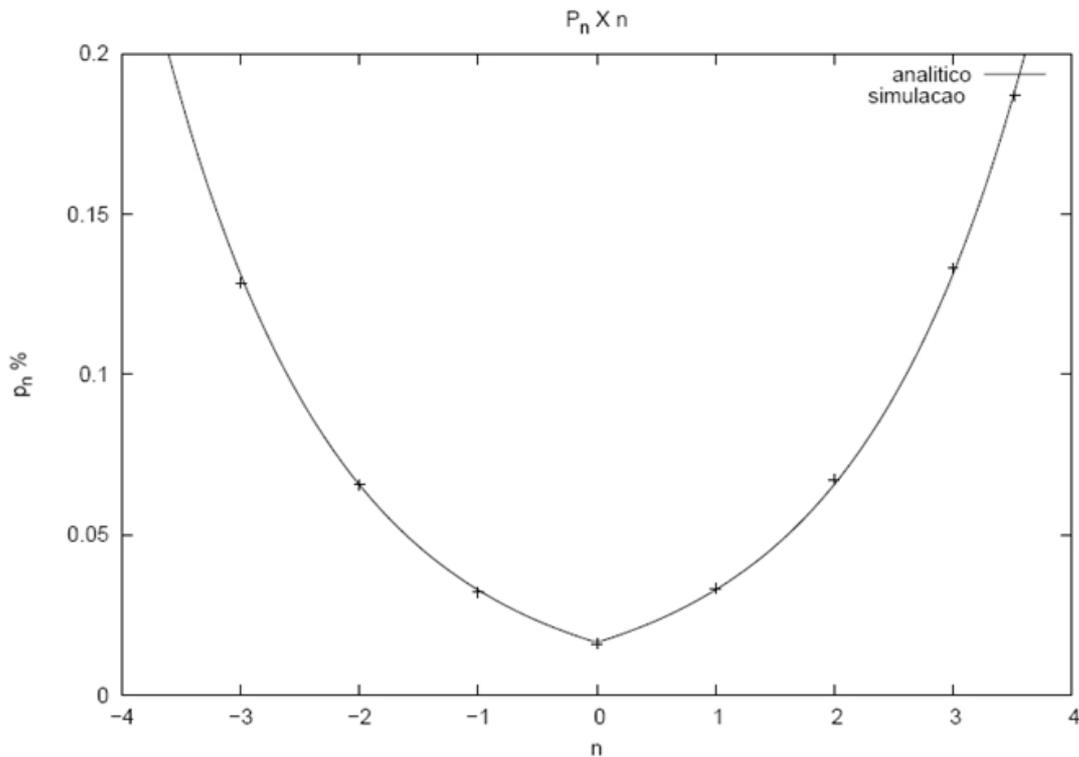


Figura 6.2: Validação da Implementação quando $\rho = 0,5$: Confrontação dos resultados previstos pela modelagem analítica (linha cheia) com os pontos obtidos via simulação.

6.2 Análise da Metodologia de Realização de Simulações sem Fase Transiente

O objetivo desta seção é avaliar via simulações o impacto da fase transiente em determinadas métricas que podem afetar o desempenho de uma rede *Ad Hoc*. A idéia é ilustrar a contribuição da fase transiente nos resultados obtidos e também, verificar a eficiência do método proposto de redução desta fase transiente.

6.2.1 Métricas

Nesta avaliação foram definidas um conjunto de métricas baseadas nos estudos realizados em [60] e [22]. Estas métricas permitem avaliar as propriedades de conectividade entre os nós a partir de uma análise topológica. De acordo com a referência

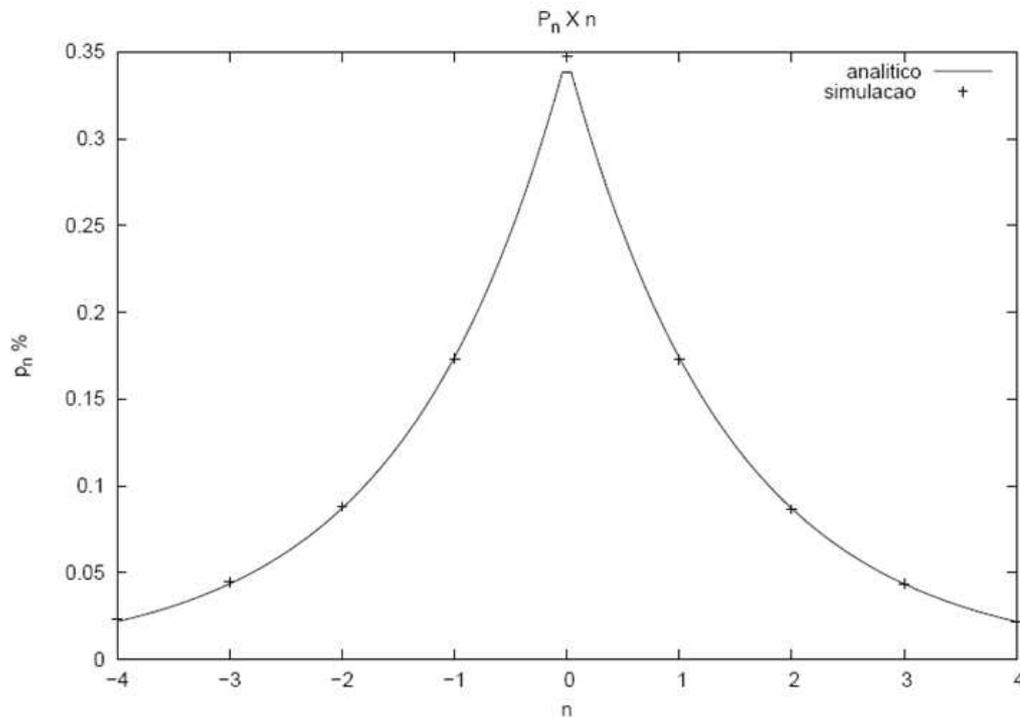


Figura 6.3: Validação da Implementação quando $\rho = 1,5$: Confrontação dos resultados previstos pela modelagem analítica (linha cheia) com os pontos obtidos via simulação.

[22] o desempenho dos protocolos de roteamento são afetados pela topologia da rede e pelo modo como a topologia varia com o passar do tempo. Sendo assim, optou-se por utilizar métricas que isolem os efeitos originados pela mobilidade ao invés de usar métricas tradicionais de avaliação de desempenho de redes *Ad Hoc* como: taxa de entrega de pacotes ou sobrecarga dos protocolos de roteamento. Desta forma pretende-se obter uma maior compreensão do impacto da mobilidade no desempenho final de uma rede sem fio através da utilização de métricas de mobilidade que são *independentes de protocolos*.

Com o objetivo de capturar melhor a evolução das métricas com o passar do tempo, o tempo de simulação foi segmentado em intervalos de 10 segundos. Desta forma, os resultados obtidos são os valores médios das métricas calculados em cada um destes segmentos de 10 segundos.

De forma a tornar possível esta avaliação foram definidas as seguintes métricas

baseadas nos estudos realizados em [60] e [22]:

- **Velocidade Média** → Velocidade média dos nós em função do tempo. Seja V_k^i a velocidade média da i -ésima estação no k -ésimo intervalo de tempo. O valor da velocidade média no intervalo k , dado que existem I estações, é dado por:

$$V_k = \sum_{i=0}^I \frac{V_k^i}{I} \quad (6.1)$$

- **Número Médio de Nós dentro do Raio da Alcance** → o número médio de nós dentro do raio de alcance de cada estação (vizinhos). Seja R o raio de transmissão da estação, (X_i^k, Y_i^k) a coordenada da estação i no intervalo k e (X_j^k, Y_j^k) a coordenada da estação j no intervalo k . A estação j está dentro do raio de alcance da estação i no segmento de tempo k se, e somente se, a equação (6.2) for satisfeita:

$$\sqrt{(X_i^k - X_j^k)^2 + (Y_i^k - Y_j^k)^2} \leq R^2 \quad (6.2)$$

Seja W o Número de Nós dentro do Raio da Alcance da estação i . W é dado pelo conjunto de estações j que estão dentro do alcance da estação i no intervalo k . O valor da métrica *Número Médio de Nós dentro do Raio da Alcance* no intervalo k é dado por:

$$\sum_{i=0}^I \frac{W_k^i}{I} \quad (6.3)$$

- **Quantidade Média de Nós Isolados** → representa o número de nós que não têm nenhuma estação dentro do seu raio de alcance em função do tempo. Quando a estação i , não encontra nenhuma estação j que satisfaça a condição (6.2) no segmento k diz-se que a estação está isolada.
- **Quantidade Média de Novos Contatos** → Quando uma estação j não se encontra dentro do raio de alcance da estação i no instante $k-1$ e no instante k se encontra, diz-se que a estação i tem um novo contato. Seja ϕ_i^k o conjunto de

estações j que satisfaçam esta condição no intervalo k . A *Quantidade Média de Novos Contatos* no intervalo k é dada por:

$$\sum_{i=0}^I \frac{\phi_i^k}{I} \quad (6.4)$$

- **Quantidade Média de Contatos Perdidos** → Quando uma estação j se encontrava dentro do raio de alcance da estação i no estante $k-1$ e no instante k não se encontra mais, diz-se que a estação i teve um contato perdido. Seja ξ_i^k o conjunto de estações j que satisfaçam esta condição no intervalo k . A *Quantidade Média de Contatos Perdidos* no intervalo k é dada por:

$$\sum_{i=0}^I \frac{\xi_i^k}{I} \quad (6.5)$$

6.2.2 Cenário das Simulações

O cenário de simulação foi composto por uma área de $1000m \times 1000m$, com 100 estações móveis distribuídas uniformemente na área de simulação. Foram realizadas 50 rodadas de simulação. As simulações rodaram por 2000 segundos. O modelo foi parametrizado da seguinte forma: $\lambda = \mu = 0.005$, $N = 4$, a base vale 1.835 resultando em uma velocidade máxima de $\sqrt{2}b^N = 22,56 \text{ m/s}$.

Nas simulações foram avaliadas duas implementações do modelo proposto: na primeira implementação, denominada convencional, a cadeia sempre é inicializada a partir do estado zero, $n = 0$, em ambos os eixos. Na segunda implementação, chamada de simulação perfeita, a cadeia é inicializada de acordo com as distribuições estacionárias obtidas no Capítulo 4 conforme descrito no Capítulo 5.

6.2.3 Resultados

A métrica *Varição da Velocidade em Função do Tempo* ilustra em quanto tempo a simulação leva até atingir o estado estacionário. Esta métrica também ajuda a entender a influência da mobilidade nas demais métricas. A partir do gráfico

6.4 é possível perceber que com o auxílio do método da rejeição a velocidade é praticamente constante durante todo o tempo de simulação. É muito importante observar que o sistema leva aproximadamente 1700 segundos para atingir o estado estacionário.

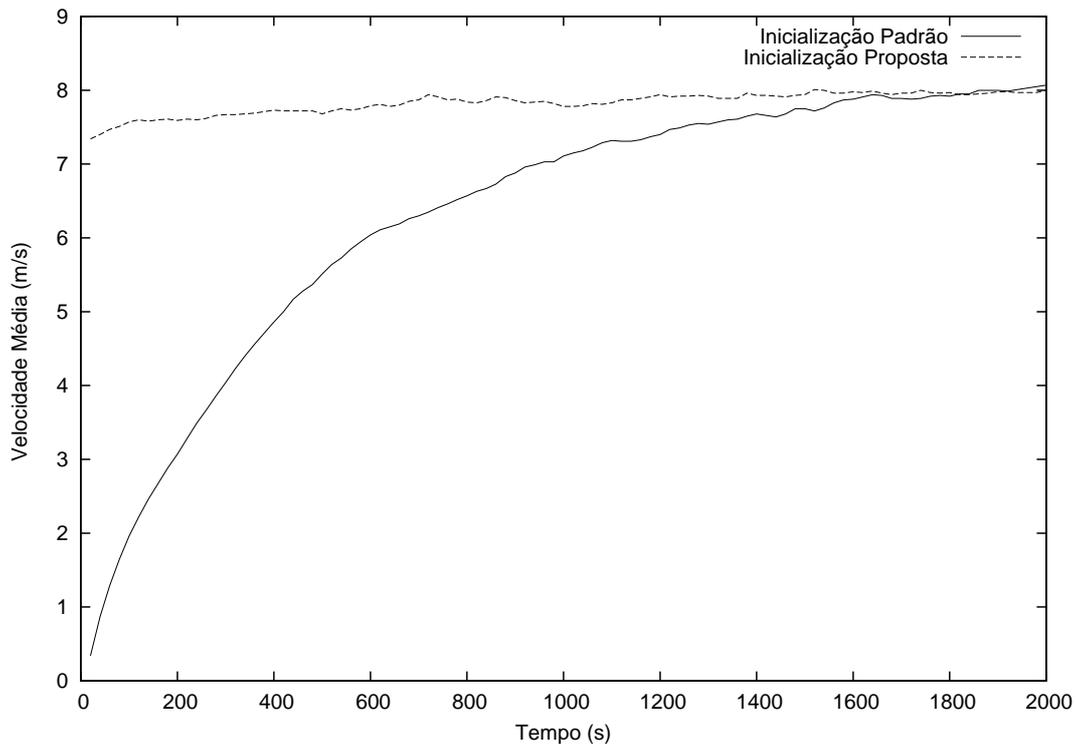


Figura 6.4: Análise da Metodologia de Realização de Simulações sem Fase Transiente: Velocidade Média em Função do Tempo

A métrica *Número Médio de Nós dentro do Raio da Alcance* apresenta o número médio de vizinhos de cada estação. Esta métrica está intimamente relacionada a densidade do nós e pode-se perceber a partir do gráfico 6.5 que este número é aproximadamente constante durante todo o tempo de simulação. Isto indica que a densidade dos nós também é constante.

Os resultados para a métrica *Quantidade de Nós Isolados* indicaram que, para o raio de transmissão de 200m, não existe nenhum nó isolado em nenhum instante de tempo durante todo o tempo de simulação. Esta afirmação vale para os dois métodos de inicialização. Por este motivo, o gráfico desta métrica será omitido.

O gráfico da figura 6.6 apresenta os resultados das simulações para a métrica

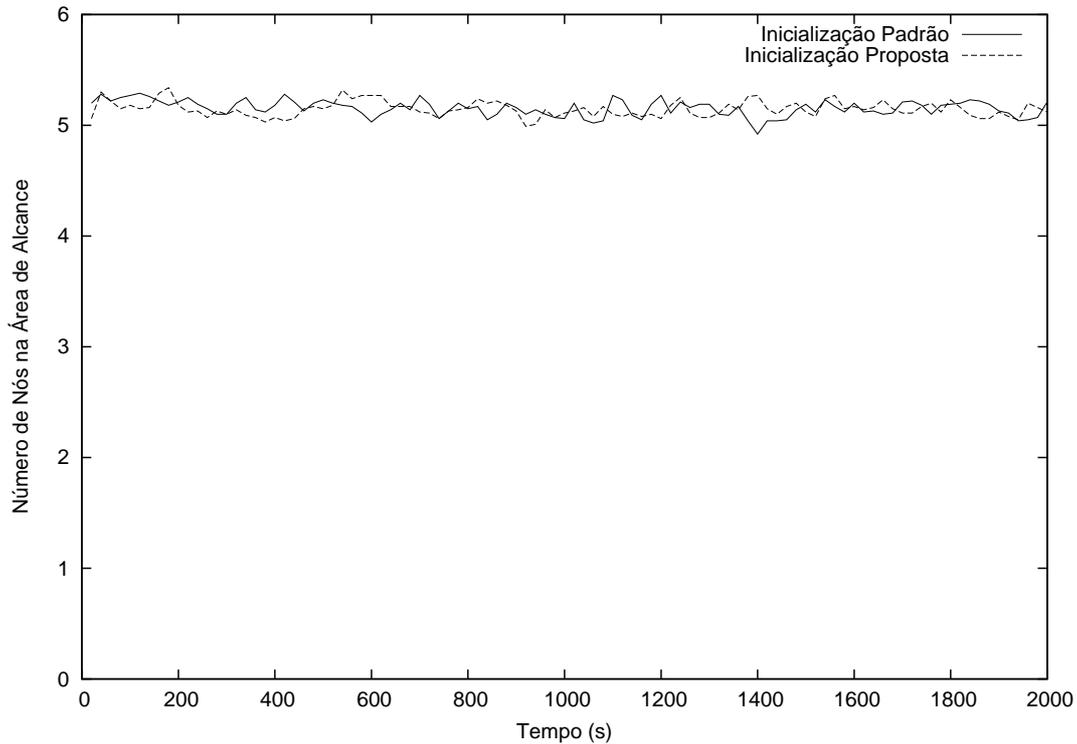


Figura 6.5: Análise da Metodologia de Realização de Simulações sem Fase Transiente: Número Médio de Nós dentro do Raio da Alcance em função do tempo

Quantidade Média de Novos Contatos. Os resultados da métrica *Quantidade Média de Contatos Perdidos* podem ser visto no gráfico 6.7. A soma destas duas variáveis pode ser interpretada como uma taxa de variação de links. Em ambos os gráficos pode-se perceber que a inicialização proposta apresenta uma convergência para o estado estacionário muito mais rápida do que com o método de inicialização convencional.

Conforme pôde ser observado nos resultados desta seção, há uma grande diferença entre o comportamento do modelo proposto na fase transiente e o comportamento do modelo proposto em regime estacionário. Estes resultados são um forte argumento a favor da realização de simulações perfeitas enfatizando de vez a necessidade de se avaliar os modelos de mobilidade em regime estacionário. Estes resultados por si só, justificaram a necessidade da criação de um novo modelo de mobilidade.

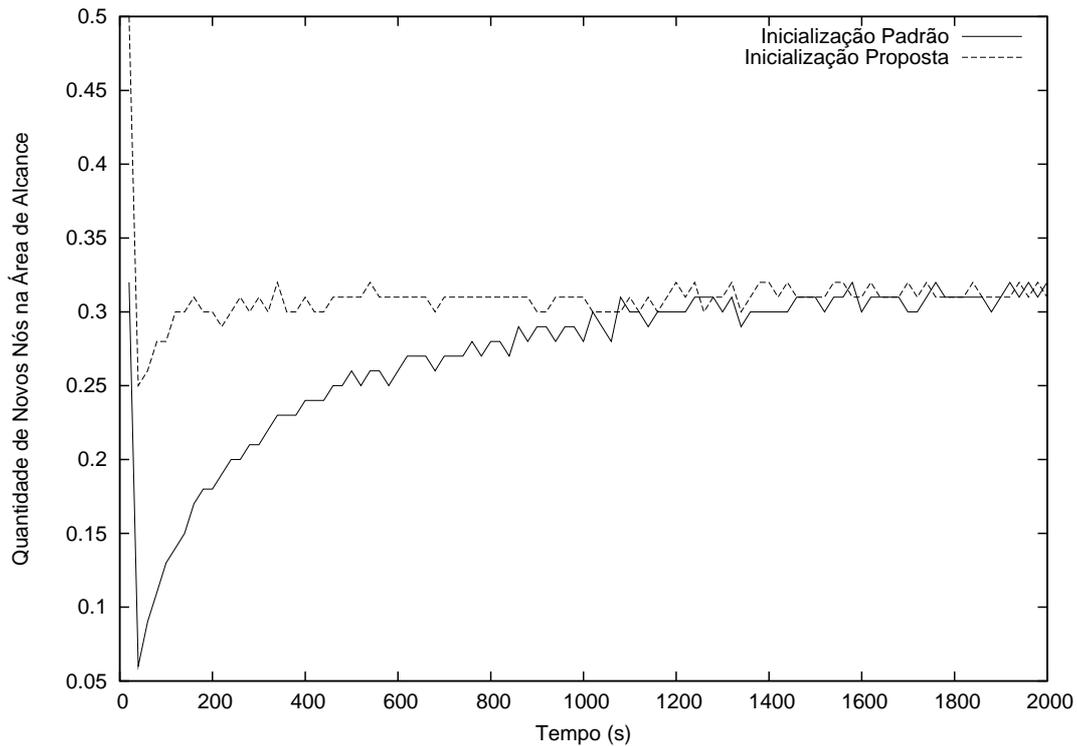


Figura 6.6: Análise da Metodologia de Realização de Simulações sem Fase Transitente: Quantidade Média de Novos Contatos em função do tempo

6.3 Avaliação Comparativa com Outros Modelos de Mobilidade

A partir do exposto na seções anteriores, não é realista um modelo de mobilidade onde as velocidades e direções futuras não sejam dependentes das velocidade e direções anteriores, ou seja, uma movimentação real é feita com um senso de direção. De forma a verificar qual modelo de mobilidade é mais semelhante com os padrões de movimentação que são esperados no mundo real, foi adotada a mesma solução de [13]. Conforme será visto, de acordo com as métricas definidas nesta seção, o modelo proposto apresentou um comportamento mais realista do que os modelos de mobilidade *Random Way Point* e o MMIG.

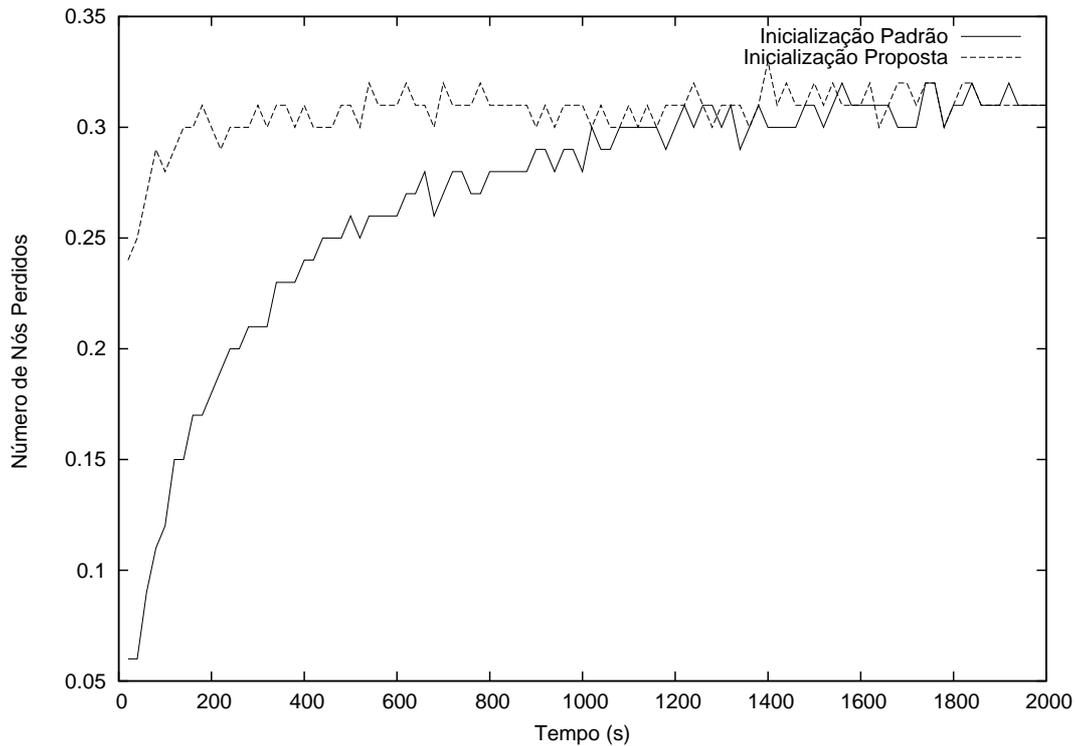


Figura 6.7: Análise da Metodologia de Realização de Simulações sem Fase Transiente: Quantidade Média de Contatos Perdidos em função do tempo

6.3.1 Métricas

As métricas de desempenho empregadas nesta avaliação comparativa são:

- **quantidade total de mudanças abruptas de direção** → uma mudança de direção é considerada brusca quando a diferença entre a direção no instante t e a direção no instante $t + dt$ pertence ao intervalo $[90^\circ, 180^\circ]$
- **quantidade normalizada de mudanças abruptas de direção** → número de mudanças abruptas de direção dividido pelo número total de mudanças de direção
- **quantidade total de acelerações abruptas** → uma variação de velocidade é considerada brusca quando a diferença entre a velocidade no instante t e a velocidade no instante $t + dt$ é superior a 50% da v_{max}
- **quantidade normalizada de acelerações abruptas** → quantidade total

de variações bruscas de velocidade dividida pelo número total de mudanças de velocidade

As métricas quantidade total de mudanças abruptas de direção e quantidade normalizada de mudanças abruptas de direção partem da premissa de que um usuário raramente faz uma mudança, de uma única vez, com um ângulo superior a 90° .

Da mesma forma que as variações de direção, quando uma variação de velocidade acontece, esta variação não acontece de uma única vez, a velocidade aumenta ou diminui gradativamente. Portanto, um modelo de mobilidade realista não deve permitir grandes mudanças de velocidade.

6.3.2 Cenário das Simulações

O cenário de simulação foi composto por uma área de $700m \times 500m$, com 50 estações móveis distribuídas uniformemente na área de simulação. Foram realizadas 50 rodadas de simulação com nível de confiança de 95%. As comparações foram feitas entre os modelos RWP, o RWP sem fase transiente, o MMIG e o modelo proposto. O modelo RWP foi configurado com uma velocidade uniformemente distribuída no intervalo $[0.1m/s, 12m/s]$ e tempo de pausa igual a zero (ajuste necessário para ser feita a comparação entre os modelos). O modelo RWP com simulação perfeita também foi configurado desta mesma forma. O MMIG foi configurado com uma base igual a 1.43, com n valendo 6 e m igual a 0.4 resultando em uma velocidade máxima igual $12.1m/s$.

O modelo proposto foi configurado de maneira muito semelhante ao MMIG. A base também é igual 1.43, com 6 estados e os parâmetros λ e μ valem 1. Da mesma forma que o MMIG, a velocidade máxima de $12.1m/s$.

6.3.3 Resultados

A figura 6.8 ilustra o resultado da métrica quantidade total de mudanças abruptas de direção. De acordo com as premissas assumidas na Seção 4.3.2 quanto menos

mudanças bruscas de direção um modelo faz, mais próximo da realidade ele é. Como pode ser observado nesta figura, o MMIG é o modelo de mobilidade com mais mudanças bruscas de direção. Os modelos RWP e RWP com simulação perfeita são os modelos com menos mudanças bruscas de direção e o modelo proposto se encontra em um nível intermediário entre eles. Este resultado acontece porque em um mesmo intervalo de tempo, o MMIG faz um número muito maior de transições que o RWP e talvez seja por isto que o número absoluto de mudanças bruscas de direção seja muito maior do que o número de mudanças bruscas do RWP. Esta hipótese é testada quando a métrica quantidade normalizadas de mudanças bruscas de direção é avaliada. Os resultados desta métrica podem ser observados no gráfico 6.9. A partir deste gráfico percebe-se que a hipótese é verdadeira uma vez que no modelo RWP 56% das mudanças de direção são bruscas, um resultado muito maior que o observado com os modelos Markovianos. É importante observar também a considerável diferença entre o número de mudanças bruscas de direção que o RWP apresenta quando a metodologia de simulações perfeitas é empregada. O RWP sem simulação perfeita faz 30% mais mudanças bruscas do RWP com simulação perfeita.

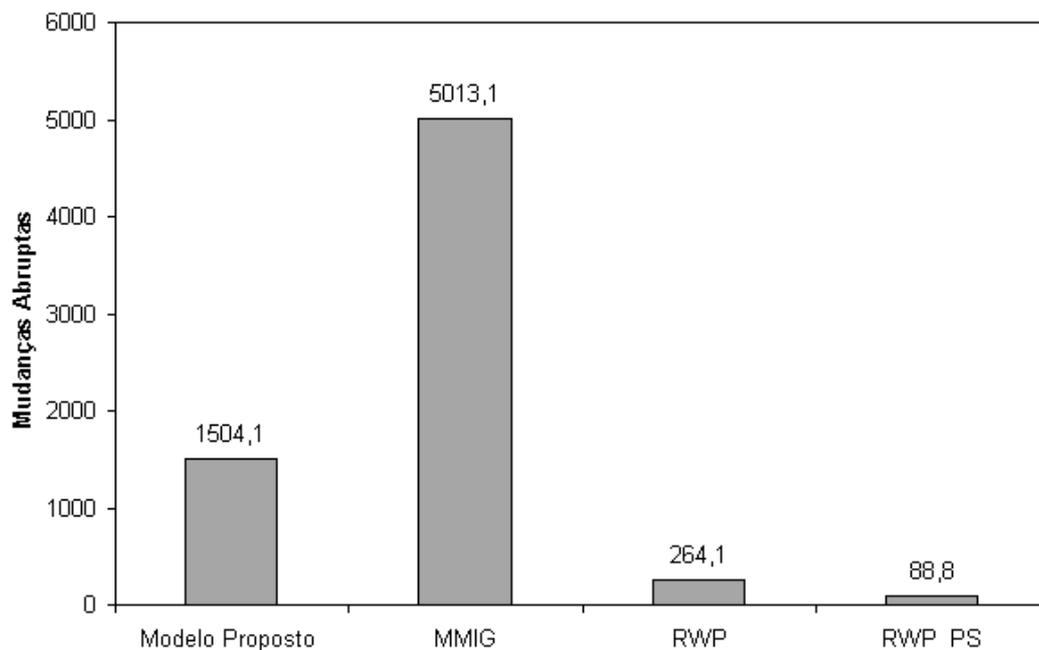


Figura 6.8: Quantidade de Mudanças Bruscas de Direção em função do modelo de mobilidade

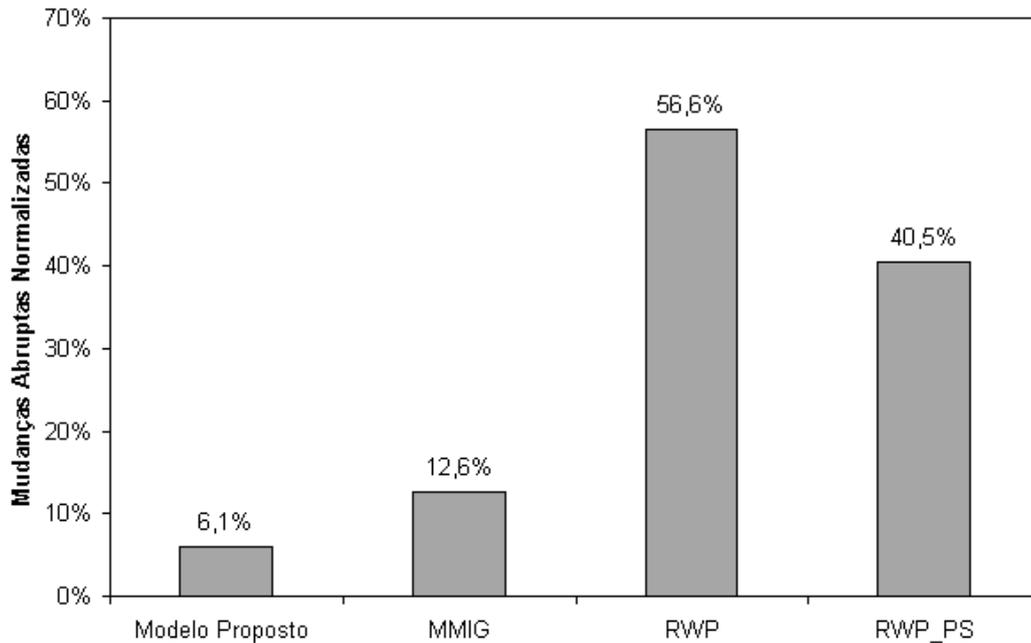


Figura 6.9: Quantidade Normalizada de Mudanças Bruscas de Direção em função do modelo de mobilidade

A diferença entre o MMIG e o modelo proposto também é considerável. Esta diferença é consequência do fato da cadeia de Markov que rege o deslocamento do MMIG ser discreta e a cadeia de Markov do modelo proposto ser contínua. Em uma cadeia de Markov discreta é possível acontecer mais de um evento em um instante de tempo, ao passo que em uma cadeia de Markov contínua isto é impossível. Uma vez que é permitido mais de uma transição simultaneamente, é mais provável que o modelo MMIG faça mais mudanças bruscas de direção do que o modelo proposto. Isto explica a diferença entre o comportamento dos dois modelos.

A figura 6.10 apresenta o resultado da quantidade de acelerações bruscas dos modelos avaliados. Conforme discutido na Seção 4.3.2, é desejável que um modelo de mobilidade faça poucas acelerações bruscas. A partir deste gráfico observa-se que o MMIG é, novamente, o modelo de mobilidade com mais acelerações bruscas. O modelo proposto e o RWP apresentam um resultado quase idêntico e o RWP com simulação perfeita é o modelo que apresenta menos acelerações bruscas. Da mesma forma que a que aconteceu com a quantidade de mudanças abruptas de direção, é necessário avaliar a métrica quantidade normalizada de aceleração bruscas. A partir

do gráfico 6.11 percebe-se novamente que a quantidade de aceleração do modelo RWP é maior. Neste caso, a diferença entre o comportamento do RWP com ou sem simulação perfeita é bem parecido.

Novamente perceber-se que o modelo proposto faz menos acelerações bruscas que o MMIG e apresenta um desempenho comparável com o RWP mesmo quando a quantidade absoluta é avaliada.

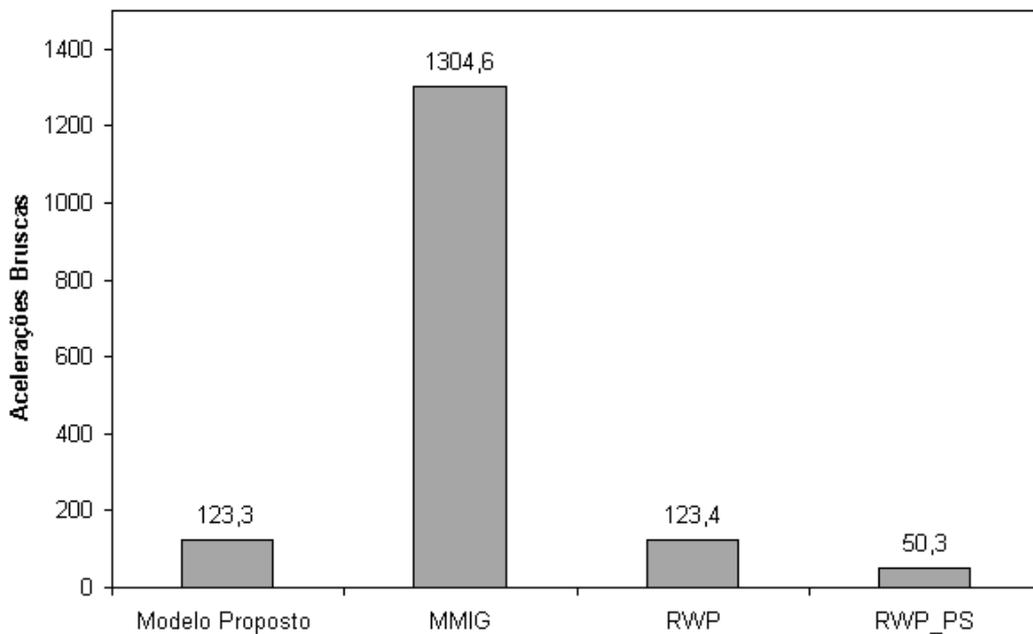


Figura 6.10: Quantidade Total de Acelerações Bruscas em função do modelo de mobilidade

6.4 Aplicação das Distribuições Estacionárias na Criação de Perfis de Mobilidade

O modelo proposto tem 4 parâmetros: a base b , a taxa de aumento de velocidade λ , a taxa de redução de velocidade μ e o número de estados da cadeia. O objetivo desta seção é demonstrar através de exemplos como as distribuições estacionárias podem auxiliar na escolha correta dos parâmetros de forma a representar o perfil de movimentação desejado.

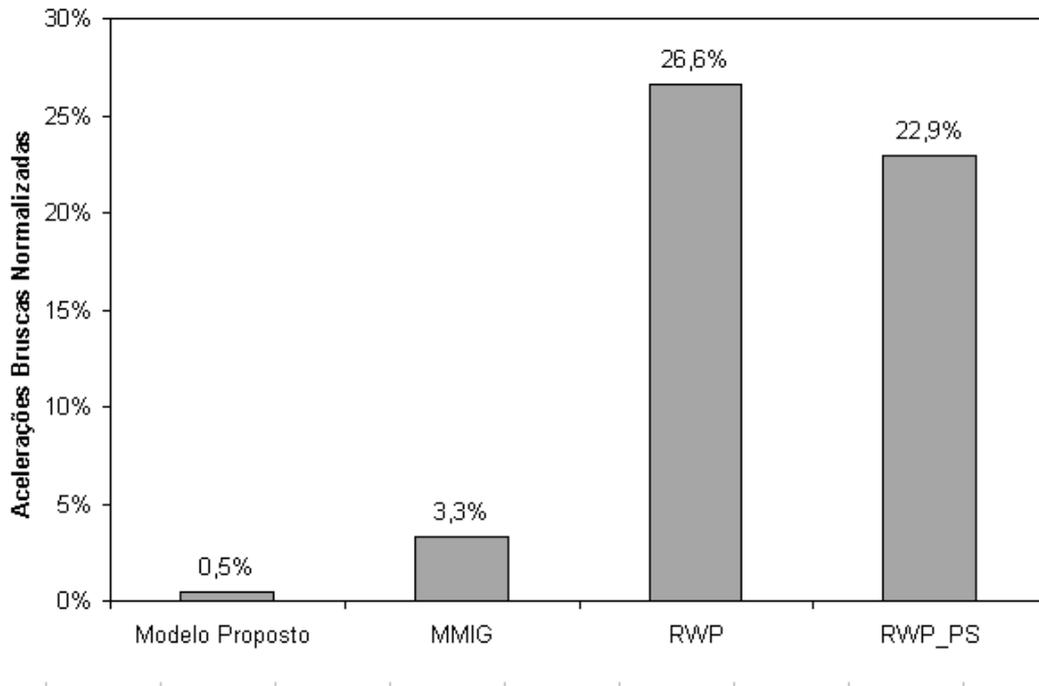


Figura 6.11: Quantidade Normalizada de Acelerações Bruscas em função do modelo de mobilidade

Se o objetivo for representar cenários de movimentação de alta velocidade deve-se escolher valores de μ e λ tal que a razão $\rho = \left(\frac{\mu}{\lambda}\right)$ seja baixa, conforme demonstrado pelas distribuições estacionárias obtidas nas equações (4.18) e (4.23). Estas equações atestam que quanto menor for a razão ρ maior é a probabilidade de um nó se deslocar a uma velocidade alta. O rastro de movimentação de uma estação móvel que se desloca de acordo com o modelo proposto está representado na figura 6.12 para o caso em que ρ vale 0.5.

Se o objetivo for representar cenários de movimentação de baixa velocidade deve-se escolher altos valores de ρ . A figura 6.13 apresenta uma amostra de um rastro de movimentação de baixa velocidade. Neste exemplo o valor de ρ adotado foi 2.

Conforme o demonstrado na equação (4.28) quanto maiores forem as taxas de mudança de estado, maior é a probabilidade de um nó mudar de direção. A figura 6.14 apresenta um rastro de movimentação quando o modelo apresenta altos valores de λ e μ como parâmetros de entrada (no caso 10 mudanças por segundo para cada um dos dois). Já a figura 6.15 ilustra um exemplo de movimentação quando o

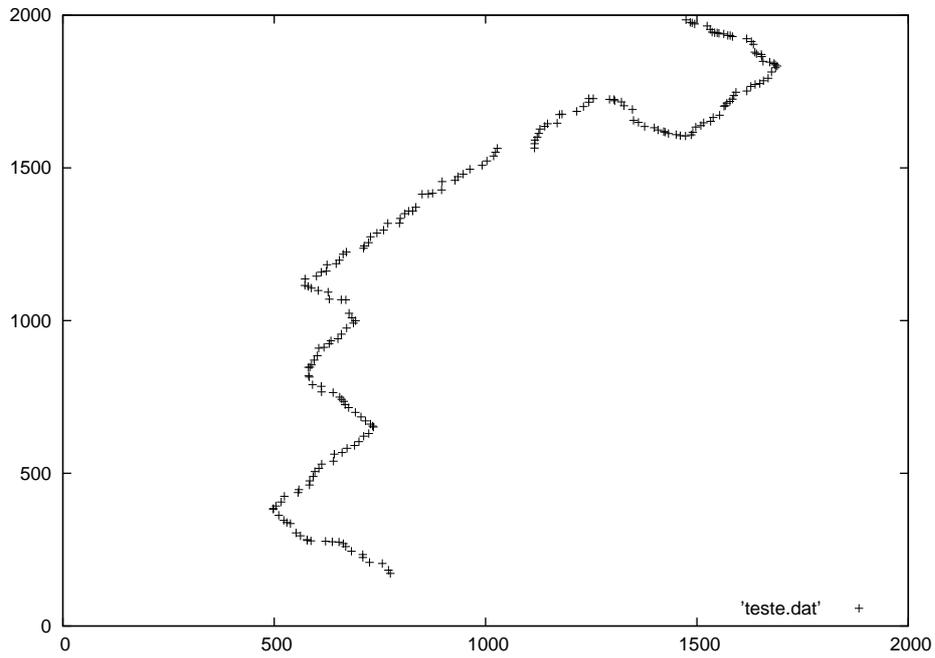


Figura 6.12: Perfil de Alta Velocidade: $\lambda = 2$, $\mu = 1$, $b=2, n=4$, tempo de simulação=200s

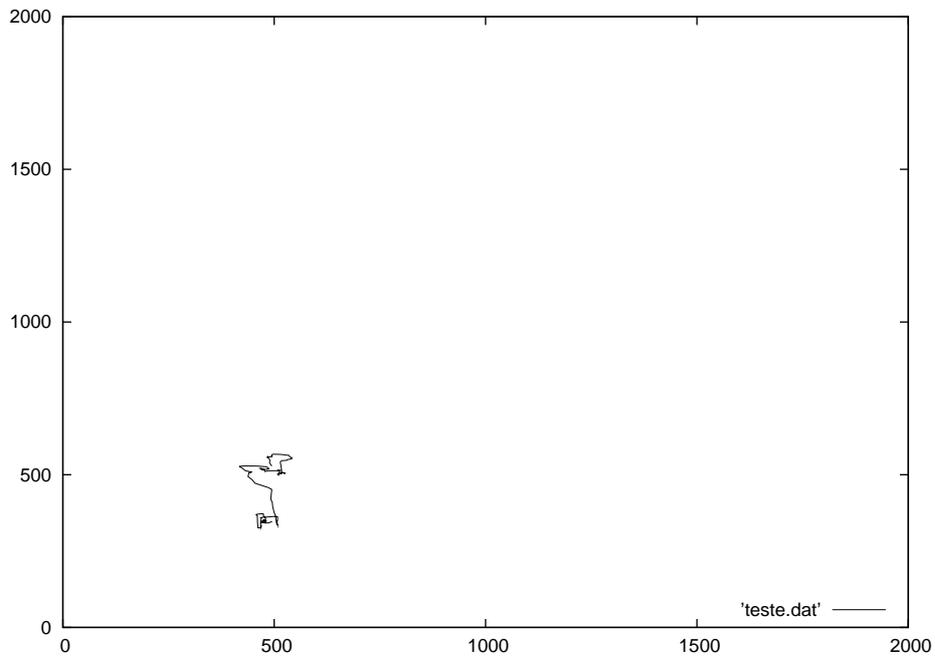


Figura 6.13: Perfil de baixa Velocidade: $\lambda = 1$, $\mu = 2$, $b=2, n=4$, tempo de simulação=200s

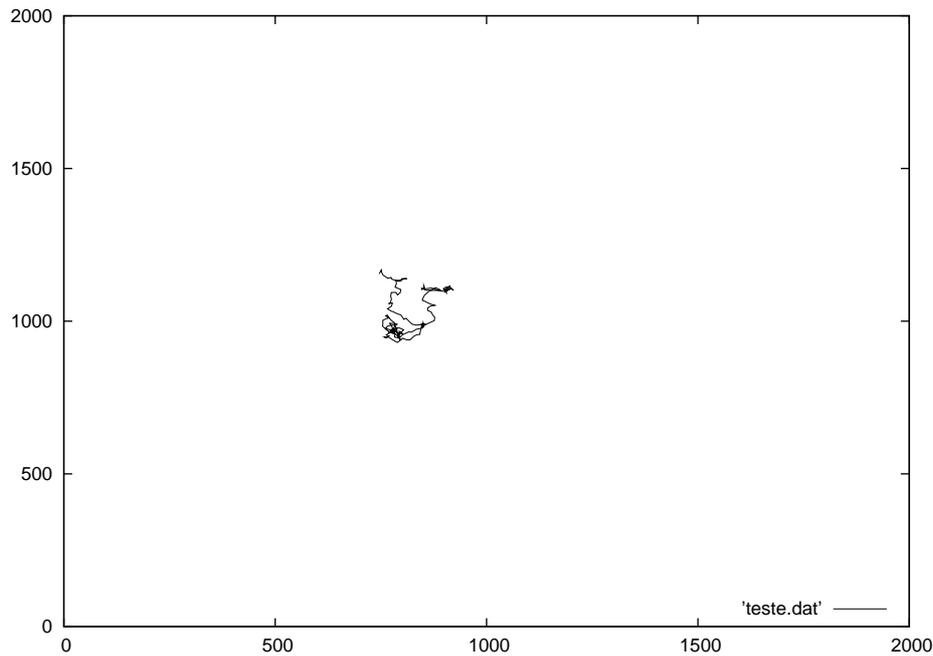


Figura 6.14: Perfil com muitas mudanças de direção: $\lambda = \mu = 10$, $b=2, n=4$, tempo de simulação=200s

modelo tem como entradas baixos valores de λ e μ .

6.5 Aplicação do Modelo Proposto em Redes *Ad Hoc*

Para verificar a influência do modelo de mobilidade sobre os resultados obtidos via simulação, nesta seção foi realizada uma avaliação do desempenho do protocolo de roteamento para redes *ad hoc* AODV [64]. O objetivo desta seção é verificar a hipótese de que a análise de desempenho do protocolo de roteamento é influenciada pela escolha do modelo de mobilidade. A confirmação desta hipótese reafirmará a importância de uma escolha criteriosa de um modelo de mobilidade conforme dito na referência [13].

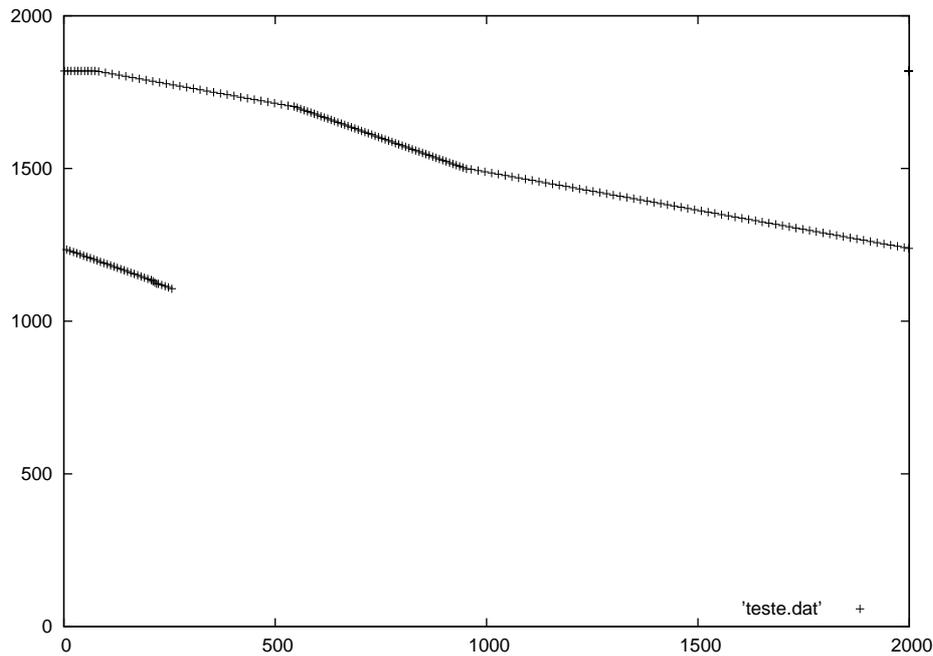


Figura 6.15: Perfil com poucas mudanças de direção: $\lambda = \mu = 0.01$, $b=2, n=4$, tempo de simulação=200s

6.5.1 Métricas

Para a avaliação de desempenho do protocolo de roteamento AODV foram utilizadas duas métricas que normalmente são utilizadas na avaliação de desempenho de protocolos de roteamento: taxa de entrega de pacotes e sobrecarga de roteamento. Estas duas métricas são definidas a seguir:

- **Taxa de entrega de pacotes** \rightarrow razão entre o número de pacotes recebidos no destino e o número total de pacotes enviados pela fonte
- **Sobrecarga de roteamento** \rightarrow razão entre o número de pacotes enviados pela fonte e a quantidade total de pacotes de roteamento transmitidos pela rede

6.5.2 Cenário das Simulações

As simulações foram realizadas dentro de uma área de simulação de $1500m \times 1000m$ com 50 estações se deslocando de acordo com 3 modelos de mobilidade: o modelo proposto, o MMIG e o RWP com simulações perfeitas. As simulações foram rodadas durante 500s. Nestas simulações variou-se a velocidade e o tráfego. Foram escolhidos 4 valores de velocidade máxima: $2m/s$, $4m/s$, $8m/s$ e $12m/s$. Os parâmetros de configuração dos 3 modelos de mobilidade avaliados se encontram nas 3 próximas tabelas:

| Parâmetros do Modelo Proposto | | | | |
|--------------------------------------|-----------|-------|------|---|
| | λ | μ | b | n |
| 2m/s | 0.01 | 0.01 | 1.1 | 4 |
| 4m/s | 0.01 | 0.01 | 1.3 | 4 |
| 8m/s | 0.01 | 0.01 | 1.54 | 4 |
| 12m/s | 0.01 | 0.01 | 1.71 | 4 |

Tabela 6.1: Parâmetros de Configuração do Modelo Proposto

| Parâmetros do MMIG | | | |
|---------------------------|-----|------|---|
| | m | b | n |
| 2m/s | 0.4 | 1.1 | 4 |
| 4m/s | 0.4 | 1.3 | 4 |
| 8m/s | 0.4 | 1.54 | 4 |
| 12m/s | 0.4 | 1.71 | 4 |

Tabela 6.2: Parâmetros de Configuração do MMIG

Todas as simulações foram realizadas no simulador NS [21]. Este simulador implementa toda a pilha de protocolos indo desde a camada física até a camada de aplicação. Ele recebe como parâmetro de entrada os arquivos de movimentação criados pelos geradores de cenários descritos no início desta seção.

Para variar o tráfego, optou-se por variar o número de conexões ativas. Foram realizadas simulações com 10, 20 e 40 conexões com tráfego do tipo CBR. As

| Parâmetros do RWP | | | |
|-------------------|-------------------|--------------------|----------------|
| | <i>speed mean</i> | <i>speed delta</i> | tempo de pausa |
| 2m/s | 1.5 | 0.5 | 0 |
| 4m/s | 3 | 1 | 0 |
| 8m/s | 5 | 3 | 0 |
| 12m/s | 7 | 5 | 0 |

Tabela 6.3: Parâmetros de Configuração do RWP

fontes foram inicializadas uniformemente nos primeiros 10 segundos de simulação. São gerados 4 pacotes de 512 bytes por segundo. O protocolo da camada de transporte escolhido foi o UDP (*User Datagram Protocol*) ao invés do TCP (*Transmission Control Protocol*) para evitar a influência do controle de congestionamento do TCP [39]. Este controle de congestionamento poderia afetar o tráfego gerado na rede dificultando a análise dos resultados.

O protocolo de roteamento escolhido foi o AODV por ser um protocolo de roteamento amplamente conhecido e bastante utilizado na avaliação de desempenho de redes *ad hoc*. Ao invés de variar o protocolo de roteamento, optou-se por manter sempre o mesmo protocolo de roteamento e variar a velocidade e o tráfego de forma a ganhar uma melhor compreensão do problema para o caso específico do AODV. Se a análise confirmar a hipótese de que os resultados obtidos com o novo modelo são diferentes dos resultados obtidos em outros estudos encontrados na literatura, existirá um indício da necessidade de se realizarem novos estudos com outros protocolos de roteamento.

Como protocolo da camada MAC utilizou-se o padrão IEEE 802.11 no modo DCF (*Distributed Coordination Function*) com RTS/CTS [29]. O raio de transmissão das estações foi ajustado para 250 m. O modelo de propagação adotado foi o *Two-Ray Ground*[66]. Este modelo de propagação considera dois raios no enlace que liga o transmissor ao receptor: o raio direto e o raio indireto refletido no chão. Em enlaces longos este modelo se mostrou mais preciso do que o clássico modelo de atenuação de espaço livre. No entanto, em curtas distância este modelo não apresenta resultados muito precisos, por isto, na implementação realizada no NS, o modelo de propagação

de espaço livre é utilizado para nós próximos da fonte e o modelo de propagação *Two-Ray Ground* é utilizado para nós mais distantes da fonte. A distância de corte no NS para uma antena omnidirecional a 1m de altura é 38,6m [21].

6.5.3 Resultados

Foram realizadas 30 simulações para cada parâmetro variado. Como foram 4 velocidades distintas e 3 valores para o número de conexões ativas para os três modelos de mobilidade, no total foram realizadas $4 \times 3 \times 3 \times 30 = 1080$ simulações para a obtenção dos resultados desta seção. Os resultados obtidos tem um nível de confiança de 95%. Na figura 6.16 são apresentados o resultado das avaliações das métricas sobrecarga de roteamento e taxa de entrega de pacotes para a velocidade de $2m/s$. A partir da figura 6.16 (a) é possível observar a grande variação que a métrica sobrecarga de pacotes de roteamento apresenta em função do modelo de mobilidade. Com 10 conexões ativas a sobrecarga de roteamento quando o modelo proposto é utilizado é aproximadamente 5 vezes maior do que a sobrecarga de roteamento medida com o RWP e 3 vezes maior do que a medida com o MMIG. Também é muito interessante observar a forma como esta sobrecarga de roteamento aumenta em função do número de conexões ativas quando o modelo de mobilidade é o modelo proposto. Para os modelos MMIG e RWP esta sobrecarga é praticamente constante, ou seja, é independente do número de conexões.

Na figura 6.16 (b) a métrica taxa de entrega de pacotes é avaliada. Pode-se observar que esta métrica não varia com o número de conexões para os modelos RWP e MMIG. Para o caso do modelo proposto existe uma ligeira queda da taxa de entrega de pacotes quando aumenta-se o número de conexões. Esta variação é desprezível se comparada com a variação que a sobrecarga de roteamento apresenta. Como o AODV é um protocolo de roteamento reativo, só há troca de mensagem quando existe a necessidade da descoberta de uma nova rota. Para o caso do modelo proposto, a sobrecarga de roteamento é diretamente proporcional ao número de conexões e a taxa de entrega não é. Isto significa que o AODV se ajusta à grande quantidade de perdas de rotas que acontecem quando o modelo proposto é utilizado

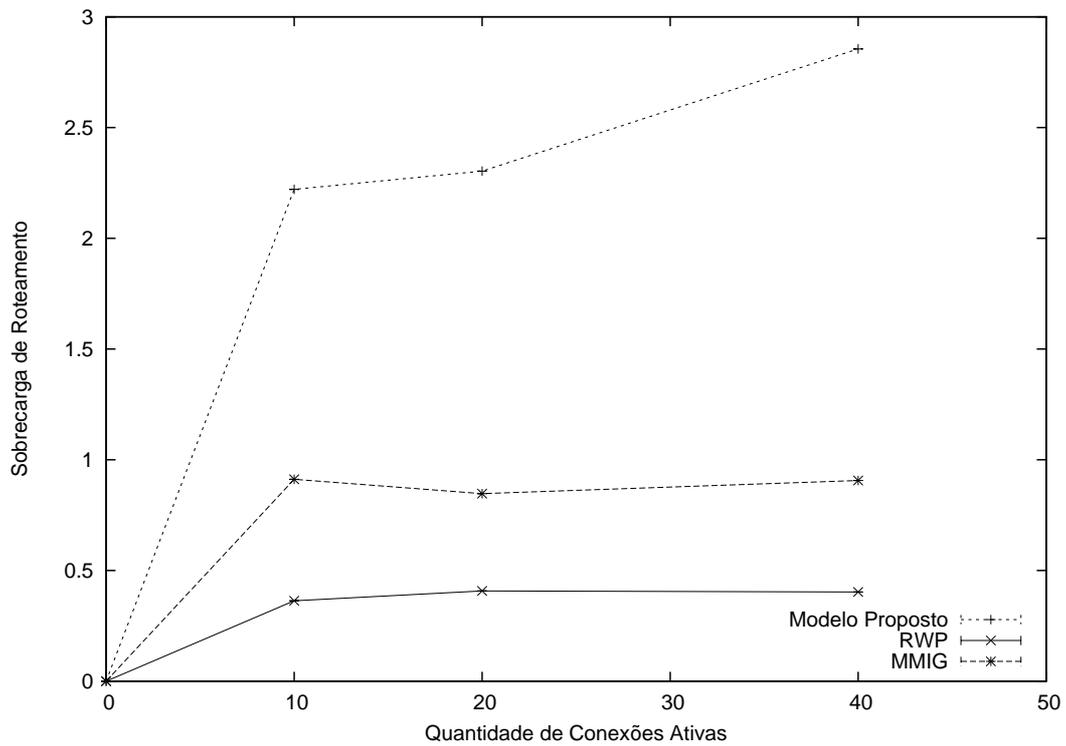
sem perder um grande número de pacotes. A alta sobrecarga de roteamento é justificada pela manutenção da taxa de entrega.

A figura 6.17 apresenta os resultados da simulação destas mesmas duas métricas quando a velocidade máxima é fixada em 4m/s. Qualitativamente os resultados obtidos são semelhantes aos resultados obtidos quando a velocidade máxima foi fixada em 2m/s. Novamente a sobrecarga de roteamento obtida com o modelo proposto foi superior a sobrecarga obtida com os modelos RWP e MMIG. Esta sobrecarga de roteamento também é diretamente proporcional ao número de conexões somente quando o modelo de mobilidade utilizado é o modelo proposto. A taxa de entrega de pacotes novamente sofreu pouca influência do aumento de conexões. Este mesmo comportamento foi observado para as velocidades de 8m/s na figura 6.18 e 12 m/s na figura 6.19.

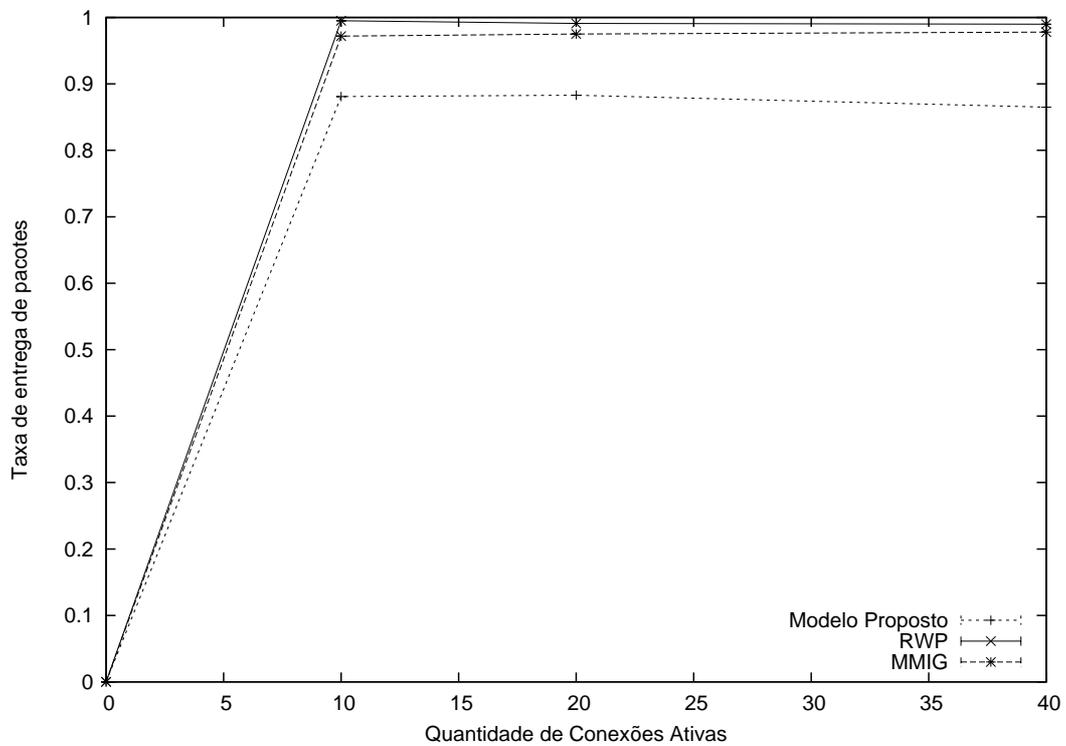
Na figura 6.20 está o resultado da variação da sobrecarga de roteamento (a) e da taxa de entrega de pacotes (b) em função da velocidade máxima quando existem 20 conexões ativas. Os resultados para 10 e 40 conexões são muito parecidos e por isto serão omitidos. Neste gráfico é possível visualizar a grande diferença entre o comportamento das duas métricas quando o modelos de mobilidade é variado. No caso do RWP quando aumenta-se a velocidade o aumento da sobrecarga de roteamento é diretamente proporcional ao aumento da velocidade enquanto a taxa de entrega de pacotes é inversamente proporcional a este aumento. No caso do MMIG, existe um ponto de inflexão na velocidade de 8 m/s. Este ponto de inflexão é o ponto aonde a sobrecarga de roteamento é máxima enquanto a taxa de entrega é mínima. Quando aumenta-se a velocidade máxima de 8m/s para 12 m/s a sobrecarga de roteamento diminui enquanto a taxa de entrega aumenta. Para estes dois modelos pode-se dizer que a sobrecarga de roteamento é inversamente proporcional a taxa de entrega de pacotes. Este fenômeno não é observado quando o modelo de mobilidade proposto é utilizado. Enquanto a sobrecarga de roteamento é diretamente proporcional a velocidade a taxa de entrega de pacotes é aproximadamente constante. Isto é observado apenas quando o modelo proposto é utilizado.

Observa-se uma enorme diferença tanto na taxa de entrega de pacotes quanto na

sobrecarga de roteamento quanto varia-se o modelo de mobilidade. É importante ressaltar que o desempenho simulado do AODV é superestimado quando o RWP é utilizado. Este fato põe à prova grande parte das avaliações de sistemas e aplicações que envolveram o AODV até agora e evidencia a necessidade de se refazer grande parte destas simulações só que desta vez com novos modelos de mobilidade.

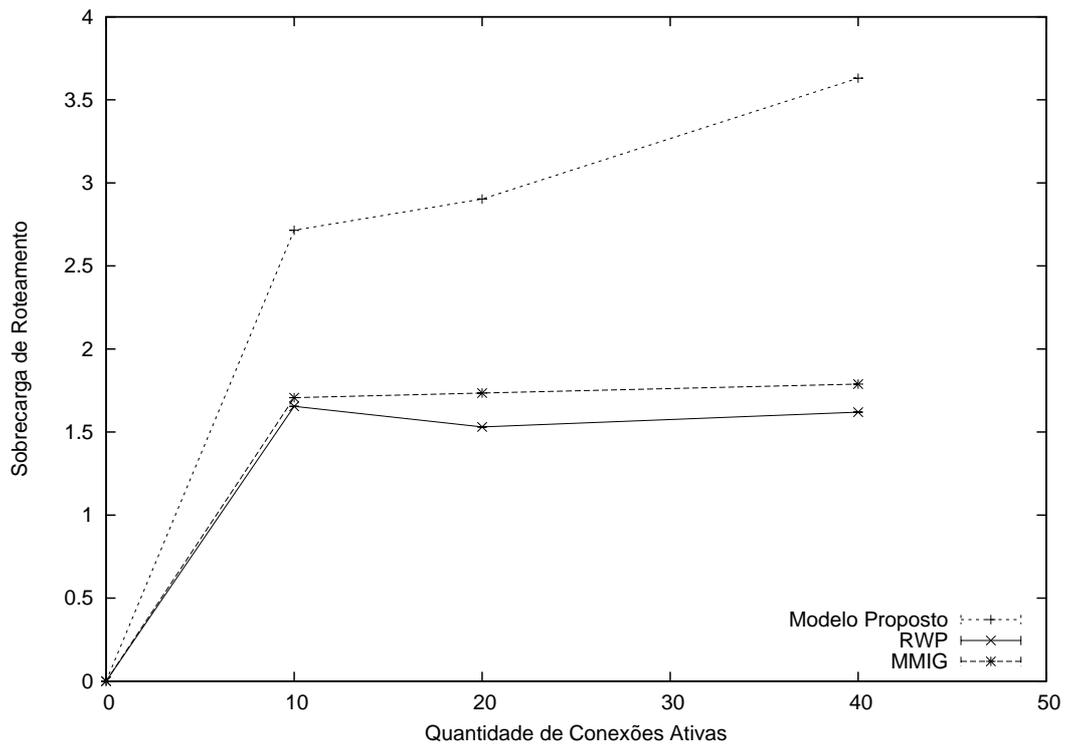


(a) sobrecarga de roteamento

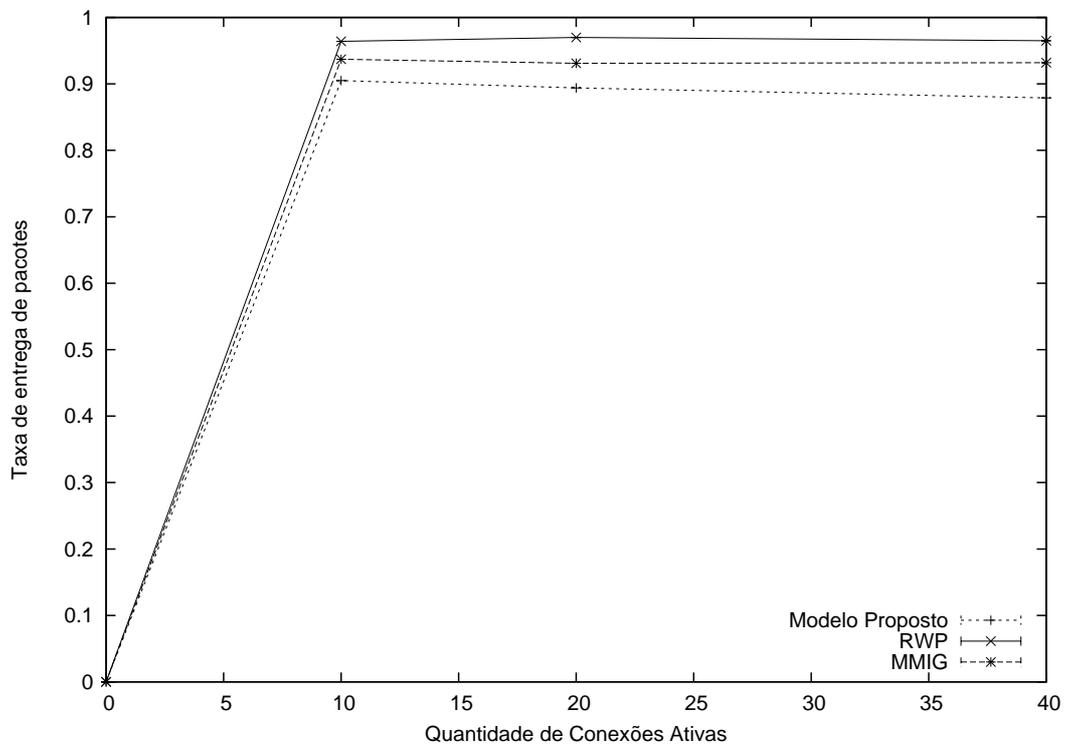


(b) taxa de entrega de pacotes

Figura 6.16: Avaliação da influência do modelo de mobilidade sobre: (a) Sobrecarga de roteamento, (b) taxa de entrega de pacotes em função da quantidade de conexões ativas, quando a velocidade máxima é fixada em 2m/s

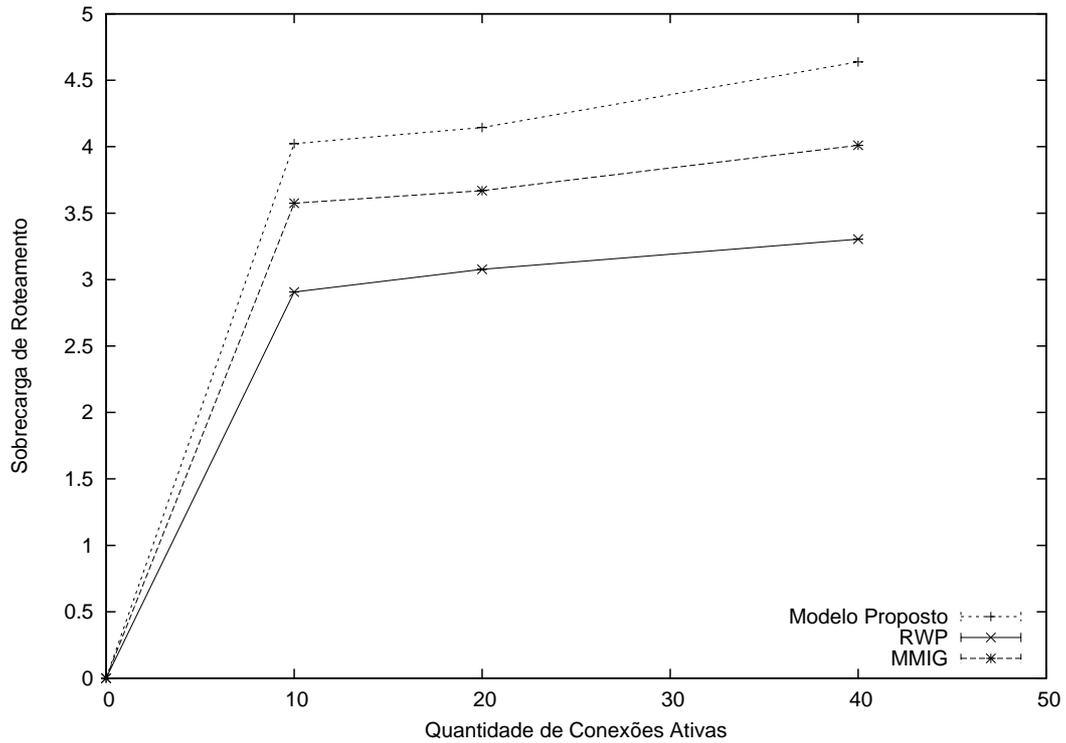


(a) sobrecarga de roteamento

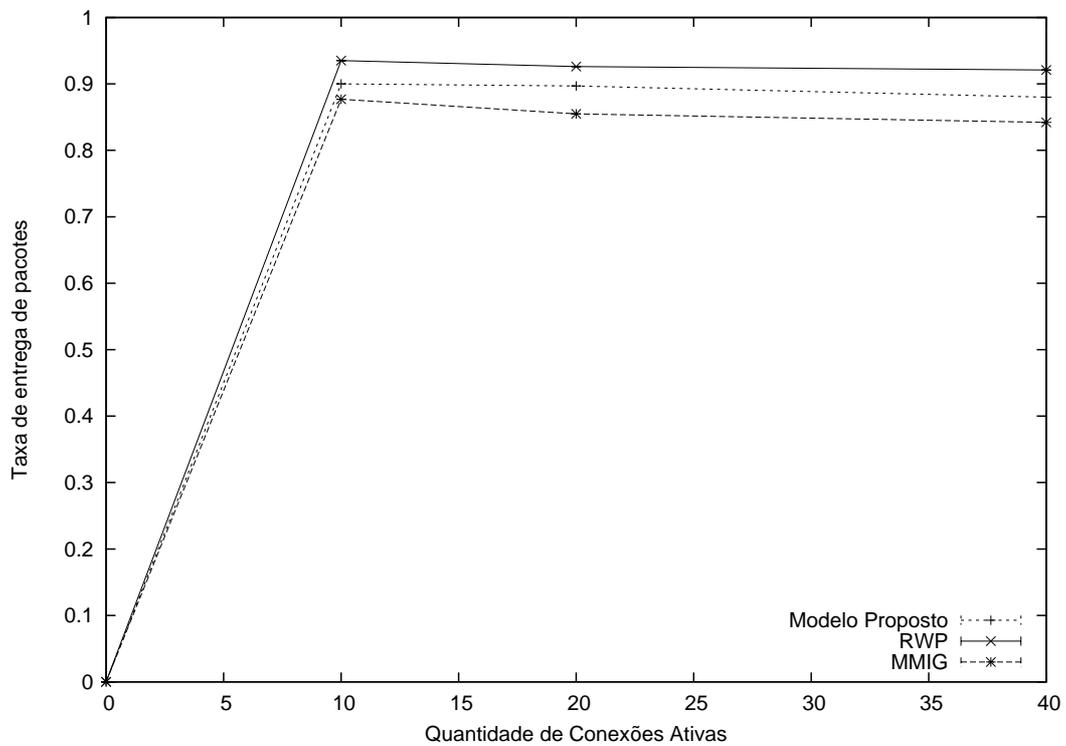


(b) taxa de entrega de pacotes

Figura 6.17: Avaliação da influência do modelo de mobilidade sobre: (a) Sobrecarga de roteamento, (b) taxa de entrega de pacotes em função da quantidade de conexões ativas, quando a velocidade máxima é fixada em 4m/s

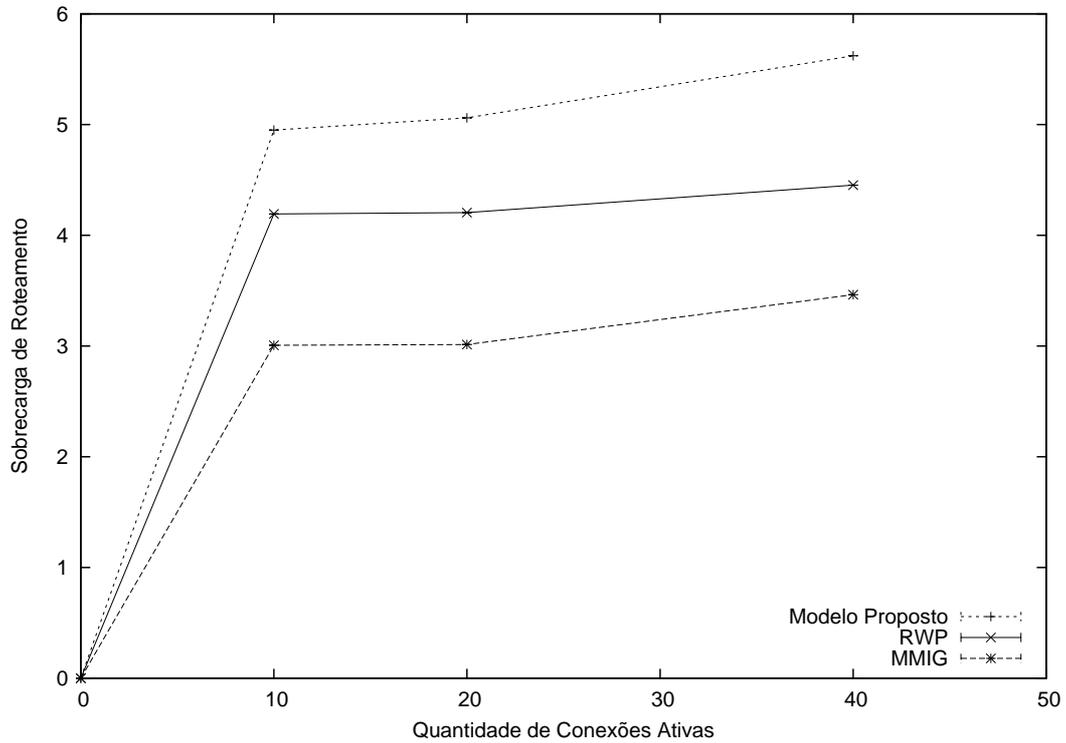


(a) sobrecarga de roteamento

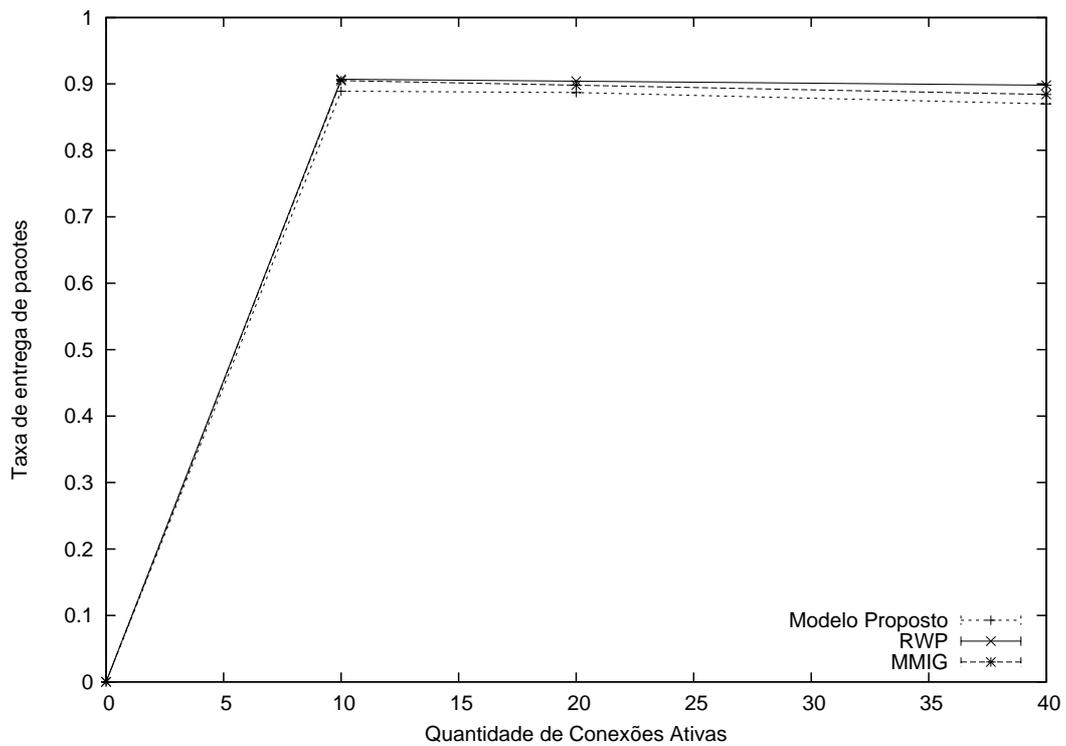


(b) taxa de entrega de pacotes

Figura 6.18: Avaliação da influência do modelo de mobilidade sobre: (a) Sobrecarga de roteamento, (b) taxa de entrega de pacotes em função da quantidade de conexões ativas, quando a velocidade máxima é fixada em 8m/s

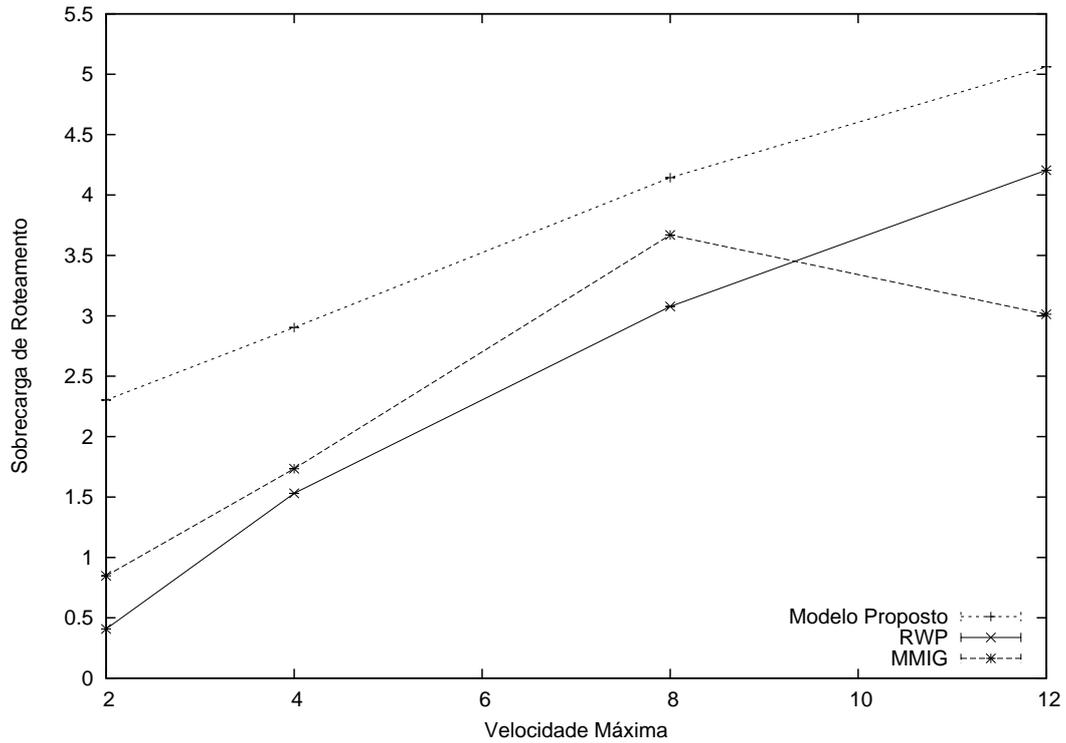


(a) sobrecarga de roteamento

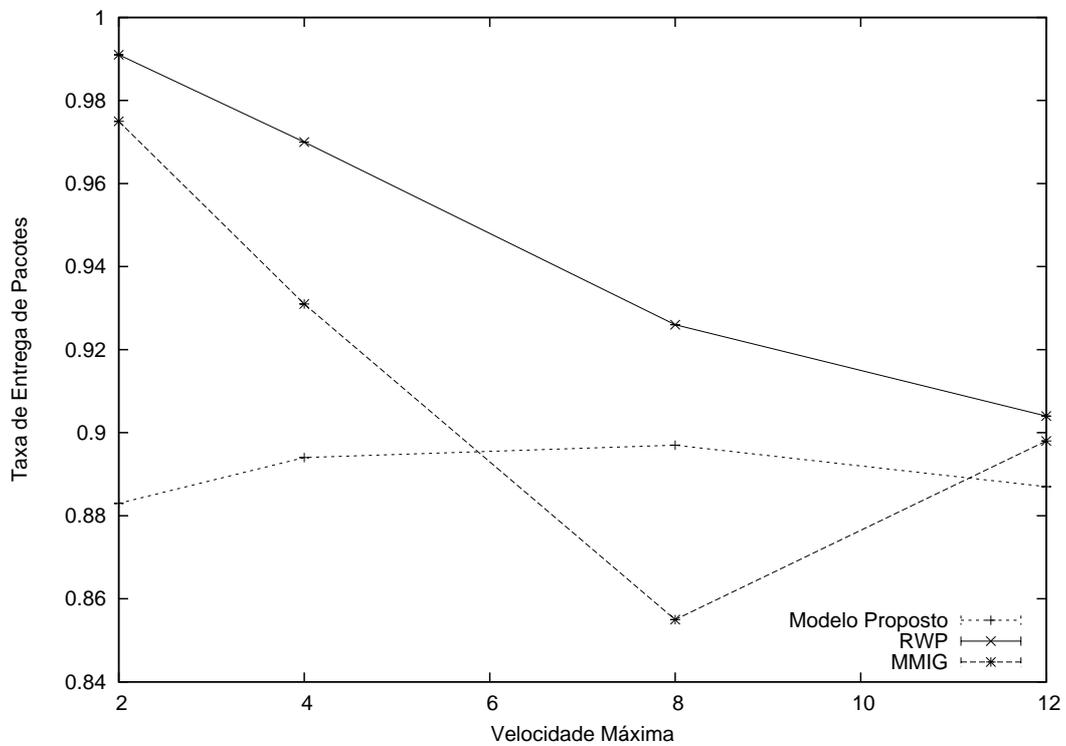


(b) taxa de entrega de pacotes

Figura 6.19: Avaliação da influência do modelo de mobilidade sobre: (a) Sobrecarga de roteamento, (b) taxa de entrega de pacotes em função da quantidade de conexões ativas, quando a velocidade máxima é fixada em 12m/s



(a) sobrecarga de roteamento



(b) taxa de entrega de pacotes

Figura 6.20: Avaliação da influência do modelo de mobilidade sobre: (a) Sobrecarga de roteamento, (b) taxa de entrega de pacotes em função da velocidade (20 conexões ativas)

Capítulo 7

Conclusões e Perspectivas de Trabalhos Futuros

“O artista nunca termina o seu trabalho; ele apenas o abandona” -

Paul Valéry

“As convicções são inimigas mais perigosas da verdade do que as mentiras.” - Friedrich Nietzsche

ESTE capítulo conclui o trabalho realizado a partir de uma revisão do problema que se quis atacar e dos resultados obtidos. Os resultados obtidos no Capítulo 6 permitiram a realização de uma série de conclusões, não só sobre problemas relativos à modelagem da mobilidade, mas também sobre avaliações de desempenho que envolvem modelos de mobilidade. Ao final deste capítulo, são feitas algumas sugestões de trabalhos futuros.

7.1 Conclusões

As redes *Ad Hoc* podem ser empregadas em diversos cenários. Avaliar o seu desempenho exige muito cuidado com os modelos escolhidos para representar a mobilidade das estações. De acordo com o Capítulo 2, na literatura existem diversos modelos de mobilidade dedicados à representação da movimentação de usuários em

uma rede sem fio. Os resultados obtidos na Seção 6.5 indicaram que a escolha do modelo de mobilidade tem um impacto significativo nos resultados das avaliações realizadas.

Conforme descrito na Seção 1.2 esta dissertação foi motivada por recentes anomalias observadas na evolução do comportamento de determinados modelos de mobilidade com o passar do tempo. Estas anomalias estão relacionadas com a existência de uma fase transiente cujo padrão de movimentação nesta fase é diferente do padrão de movimentação observado em regime estacionário. Se o objetivo da simulação for representar o comportamento de longo prazo do sistema, a componente transiente não pode estar presente no resultado final.

Dentro deste contexto, neste trabalho foi proposto um novo modelo de mobilidade que segue a premissa de que os nós se movimentam com um senso de direção e não aleatoriamente. Os resultados obtidos na Seção 6.3 indicaram que a forma como as mudanças de direção e as variações de velocidade são realizadas representam melhor os padrões esperados de movimentação.

O novo modelo de mobilidade é baseado em um processo Markoviano de nascimento e morte. Suas estruturas especiais permitiram um tratamento matemático rigoroso levando à obtenção de fórmulas fechadas para as distribuições estacionárias de velocidade e de direção.

Conforme demonstrado na Seção 3.2 estas fórmulas ajudaram a entender como os parâmetros influenciam o perfil de movimentação de uma estação móvel permitindo uma escolha adequada dos seus parâmetros em função do que se quer representar. As distribuições estacionárias demonstraram que a razão ρ entre a taxa de aumento de velocidade λ e a taxa de redução de velocidade μ influencia a distribuição da velocidade enquanto que o valor destas taxas influencia a mudança de direção de movimentação dos nós. Este conhecimento mostrou como criar perfis de baixa ou alta velocidade, com muitas ou poucas mudanças de direção.

O Capítulo 5 demonstrou como o conhecimento das *Distribuições Estacionárias* permitiu que a distribuição inicial da cadeia de Markov seja a idêntica a distribuição

no regime estacionário evitando, desta forma, a necessidade de uso de métodos de remoção da fase transiente. As simulações realizadas na Seção 6.2 comprovaram que: primeiro, existe uma fase transiente onde o desempenho da rede é diferente do desempenho observado em regime estacionário, segundo, o método proposto se mostrou eficiente na realização de simulações perfeitas.

7.2 Perspectivas de Trabalhos Futuros

Como perspectivas de trabalhos futuros pode-se citar:

- Provar mais propriedades analíticas relacionadas ao modelo proposto. Explorar algumas propriedades do processo de nascimento e morte e verificar quais são aplicáveis a um modelo de mobilidade.
- Calcular a distribuição estacionária da densidade dos nós para o modelo proposto
- Avaliação da distribuição da duração do tempo de link entre estações em uma rede *ad hoc*. As referências [2], [77] e [68] indicam que este tempo é exponencialmente distribuído. Tanto a modelagem analítica, quanto os *traces* gerados pela ferramenta desenvolvida podem ser úteis no estudo deste problema.
- As referências [24], [55], [20], [3] e [70] revelam um compromisso existente entre a capacidade, a velocidade e o retardo em redes *ad hoc*. Pode-se tentar aplicar a modelagem analítica na análise deste compromisso.
- Implementar uma variação do modelo em que as taxas λ e μ sejam função do estado da cadeia. Isto pode adicionar muita flexibilidade ao modelo.
- Avaliar a conectividade dos nós em redes *ad hoc*. Na referência [69] as distribuições estacionárias do RWP serviram para encontrar o raio mínimo de transmissão dos nós de forma que a rede esteja totalmente conectada. Fazer a mesma análise usando as distribuições estacionárias derivadas nesta dissertação

- Desenvolver métodos e métricas para a validação dos diversos modelos existentes na literatura. A validação final de qualquer modelo só é feita quando o comportamento previsto pelo modelo é comparável (dentro de uma margem de tolerância) ao comportamento apresentado pelo sistema real. Até o limite do nosso conhecimento, não existe qualquer estudo representativo apresentando registros de movimentação reais de usuários em uma rede *Ad Hoc*. Portanto, ainda não é possível comparar o desempenho dos modelos de mobilidade existentes com um comportamento real de movimentação.

Bibliografia

- [1] T. Anderson and C. DeWolfe. Myspace. URL: <http://www.myspace.com/>. Visitado em 10/08/2006.
- [2] F. Bai, N. Sadagopan, B. Krishnamachari, and A. Helmy. Modeling path duration distributions in manets and their impact on reactive routing protocols. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 22(7):1375–1373, set 2004.
- [3] N. Bansal and Z. Liu. Capacity, delay and mobility in wireless ad-hoc networks. In *Infocomm 2003*, pages 114–119, nov 2004.
- [4] A. Bar-Noy, I. Kessler, and M. Sidi. Mobile users: to update or not to update? *Wirel. Netw.*, 1(2):175–185, 1995.
- [5] C. Bettstetter. Mobility modeling in wireless networks: categorization, smooth movement, and border effects. *SIGMOBILE Mob. Comput. Commun. Rev.*, 5(3):55–66, 2001.
- [6] C. Bettstetter. Mobility modeling in wireless networks: Categorization, smooth movement, and border effects. *ACM Mobile Computing and Commun. Rev.*, 5(3):55–67, July 2001.
- [7] C. Bettstetter. Smooth is better than sharp: a random mobility model for simulation of wireless networks. In *MSWIM '01: Proceedings of the 4th ACM international workshop on Modeling, analysis and simulation of wireless and mobile systems*, pages 19–27, New York, NY, USA, 2001. ACM Press.

- [8] C. Bettstetter, G. Resta, and P. Santi. The node distribution of the random waypoint mobility model for wireless ad hoc networks. *IEEE Trans. Mobile Computing*, 2(3):257–269, July–September 2003.
- [9] Blackberry. Blackberry. URL: <http://www.discoverblackberry.com/>. Visitado em 10/08/2006.
- [10] J. Broch, D. A. Maltz, D. B. Johnson, Y.-C. Hu, and J. Jetcheva. A performance comparison of multi-hop wireless ad hoc network routing protocols. In *MobiCom '98: Proceedings of the 4th annual ACM/IEEE international conference on Mobile computing and networking*, pages 85–97, New York, NY, USA, 1998. ACM Press.
- [11] O. Buyukkokten and Google. Orkut. URL: <http://www.orkut.com/>. Visitado em 10/08/2006.
- [12] T. Camp, J. Boleng, and V. Davies. A survey of mobility models for ad hoc network research. *Wireless Communications & Mobile Computing (WCMC): Special issue on Mobile Ad Hoc Networking: Research, Trends and Applications*, 2(5):483–502, 2002.
- [13] C. A. V. Campos. Uma modelagem da mobilidade individual para redes móveis ad hoc. *Tese de Mestrado, Coppe/UFRJ*, dez 2003.
- [14] C. A. V. Campos, D. C. Otero, and L. F. M. de Moraes. Realistic individual mobility markovian models for mobile ad hoc networks. *IEEE Wireless Communications and Networking Conference-WCNC*, mar 2004.
- [15] T. Clausen and P. Jacquet. Optimized link state routing protocol (olsr). RFC 3561, oct 2003.
- [16] S. Corson and J. Macker. Mobile ad hoc networking (manet): Routing protocol performance issues and evaluation considerations. RFC 2501, jan 1999.
- [17] A. M. da Silva and L. F. M. de Moraes. Modelo de mobilidade para representação de cenários de ambientes fechados. In *XXIII Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores*. SBC, maio 2005.

- [18] A. M. da Silva, B. A. A. Nunes, and L. F. M. de Moraes. Uma avaliação dos efeitos das regras de borda e dos modelos de mobilidade no comportamento dos nós em redes ad hoc. *VI Workshop de Comunicação Sem Fio e Computação Móvel - WCSF 2004*, out 2004.
- [19] L. F. M. de Moraes and E. Hargreaves. Distribuições estacionárias de velocidade e de direção para um novo modelo de mobilidade baseado em um processo de nascimento e morte. In SBC, editor, *XXIV Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores*, maio 2006.
- [20] R. de Moraes, H. Sadjadpour, and J. Garcia-Luna-Aceves. A study on mobility-capacity-delay trade-off in wireless ad hoc networks. In *Global Telecommunications Conference Workshops, 2004. GlobeCom Workshops 2004. IEEE*, pages 114–119, nov 2004.
- [21] K. Fall and K. Varadhan. The NS manual. Visitado em 10/08/2006.
- [22] A. H. Fan Bai, Narayanan Sadagopan. Important: a framework to systematically analyse the Impact of Mobility on Performance Of Routing protocols for Ad hoc Networks. In *Proceedings of the INFOCOM 2003*, 2003.
- [23] Y. Fang, I. Chlamtac, and Y.-B. Lin. Channel occupancy times and handoff rate for mobile computing and pcs networks. *IEEE Trans. Comput.*, 47(6):679–692, 1998.
- [24] M. Grossglauser and D. N. C. Tse. Mobility increases the capacity of ad hoc wireless networks. *IEEE/ACM Trans. Netw.*, 10(4):477–486, 2002.
- [25] B. R. Haverkort. *Performance of Computer Communication Systems: A Model-Based Approach*. John Wiley & Sons, Inc., New York, NY, USA, 1998.
- [26] F. S. Hillier and G. J. Lieberman. *Introduction to Operations Research*. Sixth Edition, McGraw Hill, New York (New York, USA), 1997.
- [27] X. Hong, M. Gerla, G. Pei, and C.-C. Chiang. A group mobility model for ad hoc wireless networks. In *MSWiM '99: Proceedings of the 2nd ACM international*

- workshop on Modeling, analysis and simulation of wireless and mobile systems*, pages 53–60, New York, NY, USA, 1999. ACM Press.
- [28] C. Hurley and S. Chen. YouTube. URL: <http://www.youtube.com/>. Visitado em 10/08/2006.
- [29] IEEE 802.11. IEEE Standard for Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specification, 1999.
- [30] R. Jain. *The Art of Computer Systems Performance Analysis*. John Wiley & Sons, New York, NY, USA, 1991.
- [31] A. Jardosh, E. M. Belding-Royer, K. C. Almeroth, and S. Suri. Towards realistic mobility models for mobile ad hoc networks. In *MobiCom '03: Proceedings of the 9th annual international conference on Mobile computing and networking*, pages 217–229, New York, NY, USA, 2003. ACM Press.
- [32] A. Jardosh, E. M. Belding-Royer, K. C. Almeroth, and S. Suri. Real-world environment models for mobile network evaluation. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 23(3):622–632, 2005.
- [33] D. B. Johnson, D. A. Maltz, and Y.-C. Hu. The dynamic source routing protocol for mobile ad hoc networks (dsr). Internet Draft, july 2004.
- [34] L. Kleinrock. *Queuing Systems*, volume 1. John Wiley & Sons Publishers, (New York NY), 1975.
- [35] L. Kleinrock. On the modelling and analysis of computer networks. *Proceedings of the IEEE*, 81(8), 1993.
- [36] S. Kostin and C. L. Amorim. Métricas para Controle Eficiente de Potência de Transmissão em Cenários de Redes de Sensores com Obstáculos. Technical Report ES-692/06, COPPE/UFRJ Programa de Engenharia de Sistemas e Computação, 2006.
- [37] S. Kurkowski, T. Camp, and M. Colagrosso. Manet simulation studies: the incredibles. *SIGMOBILE Mob. Comput. Commun. Rev.*, 9(4):50–61, 2005.

- [38] S. Kurkowski, T. Camp, and M. Colagrosso. Manet simulation studies: the incredibles. *SIGMOBILE Mob. Comput. Commun. Rev.*, 9(4):50–61, 2005.
- [39] J. F. Kurose and K. Ross. *Computer Networking: A Top-Down Approach Featuring the Internet*. Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., Boston, MA, USA, 2002.
- [40] B. P. Lathi. *Modern Digital and Analog Communication Systems 3e Osece*. Oxford University Press, 1998.
- [41] J.-Y. Le Boudec. Performance evaluation lecture notes. Technical report, EPFL, mar 2004.
- [42] J.-Y. Le Boudec and D. Veitch. Simulating with awareness. Sigmetrics - Performance 2004 - Tutorials, 2004.
- [43] J.-Y. Le Boudec and M. Vojnovic. Perfect Simulation and Stationarity of a Class of Mobility Models. In *Proceedings of the INFOCOM 2005*, 2005.
- [44] A. Leon-Garcia. *Probability and Random Processes for Electrical Engineering*. second edition, Addison-Wesley, Toronto, 1994.
- [45] B. Liang and Z. J. Haas. Predictive distance-based mobility management for multidimensional pcs networks. *IEEE/ACM Trans. Netw.*, 11(5):718–732, 2003.
- [46] G. Lin, G. Noubir, and R. Rajamaran. Mobility models for ad-hoc network simulation, 2004.
- [47] P. Lévy. *A conexão planetária: O mercado, o ciberespaço, a consciência*. editora 34, 2001.
- [48] J. Macker and I. Chakeres. Mobile ad-hoc networks (manet) working group. URL: <http://www.ietf.org/html.charters/manet-charter.html> . Visitado em 10/08/2006.
- [49] J. Martin. GloMoSim tutorial. URL: <http://pcl.cs.ucla.edu/slides/workshop99/Jaytut-pw99/index.htm>. Visitado em 10/08/2006.

- [50] M. McGuire. Stationary distributions of random walk mobility models for wireless ad hoc networks. In *MobiHoc '05: Proceedings of the 6th ACM international symposium on Mobile ad hoc networking and computing*, pages 90–98, New York, NY, USA, 2005. ACM Press.
- [51] J. W. McKown and R. L. H. Jr. Ray tracing as a design tool for radio networks. *IEEE Network*, 5(6):27–30, nov 1991.
- [52] Microsoft. Self-organizing neighborhood wireless mesh networks. URL: <http://research.microsoft.com/mesh/>. Visitado em 10/08/2006.
- [53] P. Nain, D. Towsley, B. Liu, and Z. Liu. Properties of random direction models. Technical Report RR-5284, INRIA, jul 2004.
- [54] W. Navidi and T. Camp. Stationary distributions for the random waypoint mobility model. *IEEE Trans. Mob. Comput.*, 3(1):99–108, 2004.
- [55] M. Neely and E. Modiano. Capacity and delay tradeoffs for ad hoc mobile networks. *IEEE Transactions on Information Theory*, 51(6):1917–1937, jun 2005.
- [56] NIST. Kernel-aodv nist implementation. URL: http://w3.antd.nist.gov/wctg/aodv_kernel/. Visitado em 10/08/2006.
- [57] E. Nordström, H. Lundgren, D. Lundberg, C. Tschudin, and P. Gunningberg. Ape testbed. URL: <http://apetestbed.sourceforge.net/>. Visitado em 10/08/2006.
- [58] R. Ogier, F. Templin, and M. Lewis. Topology dissemination based on reverse-path forwarding (tbrpf). RFC 3684, feb 2004.
- [59] O'Reilly. Wireless mesh networking. URL: <http://www.oreillynet.com/pub/a/wireless/2004/01/22/wirelessmesh.html>. Visitado em 10/08/2006.
- [60] S. PalChaudhuri, J.-Y. L. Boudec, and M. Vojnovic. Perfect simulations for random trip mobility models. In *ANSS '05: Proceedings of the 38th annual*

- Symposium on Simulation*, pages 72–79, Washington, DC, USA, 2005. IEEE Computer Society.
- [61] Palm. Palm Treo. URL: <http://www.palm.com/us/products/smartphones/>. Visitado em 10/08/2006.
- [62] K. Pawlikowski, J. Jeong, and R. Lee. On credibility of simulation studies of telecommunication networks. *IEEE Communications Magazine*, jan 2002.
- [63] C. Perkins. *Ad Hoc networking*. Addison Wesley, 2001.
- [64] C. Perkins, E. Belding-Royer, and S. DAS. Ad hoc on demand routing. RFC 3561, july 2003.
- [65] C. Prehofer and C. Bettstetter. Self-organization in communication networks: principles and design paradigms. *IEEE Communications Magazine*, 43(7):78–85, jul 2005.
- [66] T. Rappaport. *Wireless Communications: Principles and Practice*. Prentice Hall PTR, Upper Saddle River, NJ, USA, 2001.
- [67] K. Rose. DIGG. URL: <http://digg.com/>. Visitado em 10/08/2006.
- [68] I. Rubin and Y.-C. Liu. Link stability models for qos ad hoc routing algorithms. In *Vehicular Technology Conference, 2003. VTC 2003-Fall. 2003 IEEE 58th*, pages 3084 – 3088, out 2003.
- [69] P. Santi. The critical transmitting range for connectivity in mobile ad hoc networks. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 4(3):310–317, may/june 2005.
- [70] G. Sharma and R. Mazumdar. Scaling laws for capacity and delay in wireless ad hoc networks with random mobility. In *Communications, 2004 IEEE International Conference on*, pages 3869 – 3873, jun 2004.
- [71] Sony. Sony Mylo. URL: <http://www.learningcenter.sony.us/assets/itpd/mylo/prod/index.html>. Visitado em 10/08/2006.

-
- [72] Uppsala. Aodv-uu uppsala university implementation. URL: <http://core.it.uu.se/adhoc/AodvUUImpl>. Visitado em 10/08/2006.
- [73] J. Wales and L. Sanger. Wikipédia. URL: <http://pt.wikipedia.org>. Visitado em 10/08/2006.
- [74] K. Wang and B. Li. Efficient and guaranteed service coverage in partitionable mobile ad-hoc networks. In *Proceedings of the INFOCOM 2002.*, 2002.
- [75] J. Yoon, M. Liu, and B. Noble. Random waypoint considered harmful. In *Proceedings of the INFOCOM 2003*, 2003.
- [76] J. Yoon, M. Liu, and B. Noble. A general framework to construct stationary mobility models for the simulation of mobile networks. *IEEE Trans. Mob. Comput.*, 5(7):860–871, jul 2006.
- [77] R. Zhang and I. Rubin. Mobility induced robust throughput behavior in mobile ad hoc networks. In *Vehicular Technology Conference, 2004. VTC2004-Fall. 2004 IEEE 60th*, pages 2708–2711, set 2004.