
MODELOS DE MOBILIDADE: PROPRIEDADES, SIMULAÇÃO E
APLICAÇÃO A UM PROBLEMA DE OTIMIZAÇÃO DE RECURSOS

CARLA RODRIGUES COSTA

Orientador: Prof. Dr. Alejandro César Frery Orgambide

Área de concentração: Estatística Aplicada

Dissertação submetida como requerimento parcial para obtenção do
grau de Mestre em Estatística pela Universidade Federal de Pernambuco

Recife, fevereiro de 2003

A meus pais, Luiza e Faustino.

Agradecimentos

A Deus, por ter iluminado meu caminho nessa batalha árdua e gloriosa.

A Rubens, pelo amor e carinho a mim dedicado.

A minhas sobrinhas, Ana Luísa, Ana Paula e Clara, pela alegria que me deram.

A meus irmãos, Alexandre, Fábio e Fátima, pelo amor incondicional.

Ao professor Alejandro César Frery Orgambide, pelo estímulo e paciência em ouvir minhas dúvidas.

A Jaércia, pelo carinho e incentivo.

A Elizabete, pela sua amizade.

A Hanyk, Simone e Michelle, por acreditarem na minha vitória.

Aos professores do Programa de Mestrado em Estatística da UFPE.

A Patrícia Leone, pelos conhecimentos a mim passados.

Às colegas da minha turma de mestrado, a Michelli, Diana e Amanda, pelo companheirismo.

A todos os colegas de mestrado, Silvia, Gilson, Patrícia Leal, Keila, Moisés, João Marcelo, Cristina, Bartolomeu, Felipe, Tatiene, Tarciana, Heráclito, Raydonal, Marcelo e Toni.

A Valéria, pela competência e disponibilidade.

Aos participantes da banca examinadora, pelas sugestões.

À CAPES, pelo auxílio financeiro.

Resumo

A literatura de redes de computadores apresenta uma ampla diversidade de modelos de mobilidade que envolve diferentes mecanismos de representação de movimentos. Os modelos de mobilidade descrevem o comportamento do deslocamento de um indivíduo ou de um grupo deles. Nesta dissertação será apresentado um modelo de mobilidade que se mostrou adequado à descrição do comportamento de locomoção individual de usuários de serviços de telefonia sem fio, após uma revisão crítica da bibliografia existente. Para este modelo é proposto um mecanismo de transmissão e propagação de mensagens. Do ponto de vista da estatística computacional, será mostrada uma implementação que permite fazer simulações do modelo com o objetivo de medir características que, analiticamente, são difíceis de serem mensuradas. Mostra-se um estudo de caso aplicado ao comportamento de usuários de celulares em ambientes fechados, como o de um *shopping center*, e à distribuição de mensagens. A distribuição temporal da informação é avaliada com uma experiência de Monte Carlo.

Abstract

The computer networks literature includes a wide diversity of mobility models that involve different mechanisms of movement representation. These mobility models describe the motion behavior of individuals or groups of individuals. In this dissertation a mobility model that is suitable for the description and simulation of individual locomotion behavior of wireless call service users will be presented, after a review of the current relevant bibliography. For this model, we introduce a mechanism of transmission and propagation of information, e.g., messages or text. An implementation that allows the measurement of features that analytically are not tractable is presented. A case study of information propagation in closed environments, such as inside a shopping center, is presented. The temporal and spatial distribution of information is assessed with a Monte Carlo experience.

Sumário

Lista de Figuras	vii
1 Introdução	1
1.1 Principais Considerações	2
1.1.1 Distribuições	3
1.1.2 Processos Estocásticos	6
1.2 Suporte Computacional	9
1.3 Organização do Trabalho	10
2 Principais Modelos de Mobilidade	12
2.1 Arquitetura de uma Rede Móvel Celular	12
2.2 Categorização de Modelos de Mobilidade	17
2.3 Exemplos de Modelos de Mobilidade	22
2.3.1 Modelo Browniano	22
2.3.2 Modelos de Mobilidade Celular	25
2.3.3 Modelos de Mobilidade em Grupo	27
2.4 O Modelo de Bettstetter	29
3 Modelo de Micromobilidade em Ambientes Confinados	35
3.1 Processo de Controle de Velocidade	38
3.2 Processo de Controle de Direção	43

3.3	Processo de Contágio	46
4	Descrição do Ambiente e do Estudo	50
4.1	Descrição do Estudo	50
4.2	Descrição do Ambiente	52
5	Simulação e Resultados	55
5.1	Situação 1	57
5.2	Situação 2	59
6	Conclusões e Trabalhos Futuros	64
	Referências Bibliográficas	65

Lista de Figuras

1	Formas assumidas pela densidade gama generalizada $f(x; a, b, c)$	5
2	Formas assumidas pela densidade exponencial.	7
3	Arquitetura celular.	13
4	Região de cobertura.	14
5	Procedimento de <i>handoff</i> e <i>roaming</i>	16
6	Escalas de visualização.	18
7	Dimensão.	19
8	Exemplo de um modelo de busca.	21
9	Exemplo do modelo de fluido.	22
10	Mobilidade de um usuário usando o tempo para alterar a velocidade e direção.	24
11	Mobilidade de um usuário usando a direção para alterar a velocidade e direção.	24
12	Diagrama dos estados de processo e suas respectivas probabilidades de transição.	26
13	Representação gráfica do processo de controle de velocidade.	32
14	Representação gráfica do processo de controle de direção.	33
15	Mobilidade de um usuário usando o modelo de Bettstetter	36
16	Mobilidade de um usuário usando a regra de borda.	37
17	Mecanismo de regra de borda de Almeida	37
18	Esquema do modelo proposto por este trabalho.	38
19	Representação gráfica do processo de controle de velocidade para t_1^*	40
20	Representação gráfica do processo de controle de velocidade para t_2^*	41

21	Representação gráfica do processo de controle de velocidade para t_3^*	41
22	Representação gráfica do processo de controle de velocidade no tempo.	42
23	Representação gráfica do processo de controle de direção para t_1^*	44
24	Representação gráfica do processo de controle de direção para t_2^*	45
25	Representação gráfica do processo de controle de direção para t_3^*	45
26	Representação gráfica do processo de controle de direção no tempo.	46
27	Representação gráfica do mecanismo de contágio primário.	47
28	Representação gráfica do mecanismo de contágio primário no tempo.	48
29	Representação gráfica do mecanismo de contágio secundário.	48
30	Planta do piso inferior do Natal Shopping.	53
31	Primerio ambiente de estudo.	54
32	Segundo ambiente de estudo.	54
33	Representação gráfica do mecanismo de cálculo da distância máxima.	56
34	Distância percorrida em função da área de cobertura (situação 1)	58
35	Distância percorrida em função da área de cobertura móvel (situação 1)	60
36	Distância percorrida em função da área de cobertura (situação 2)	61
37	Distância percorrida em função da área de cobertura móvel (situação 2)	63

1 Introdução

A comunicação humana tem sido realizada principalmente através da linguagem nas suas formas falada, escrita e visual. Sendo a comunicação uma atividade versátil, neste trabalho o leitor encontrará uma forma de comunicação especial, a comunicação móvel celular. Este tipo de comunicação se torna importante, pois envolve as três formas de linguagem citadas acima e é de fácil acesso a todas as camadas sociais.

A demanda por sistemas de comunicação móvel celular tem apresentado nos últimos anos um crescimento bastante acelerado. A grande popularidade alcançada por este tipo de serviço vêm incentivando estudos e pesquisas para sistemas melhores e mais eficientes (Araújo Marca 1997). Os avanços em pesquisa e desenvolvimento de sistemas de telecomunicações em meios não confinados proporcionaram aos usuários e à informação a possibilidade de mobilidade. Estes fatos, em conjunto com o crescimento exponencial do número de usuários de redes, em geral, e de celulares, em particular, demonstram a grande importância estratégica envolvendo a convergência das tecnologias de comunicações móveis e de propagação de informações, bem como das combinações possíveis de aplicações envolvendo estas respectivas áreas de interesse.

Os sistemas de comunicação móvel caracterizam-se por possuir uma alta densidade de usuários e alta mobilidade, além de oferecer uma ampla variedade de serviços ao usuário, sem que o mesmo perceba a complexidade destes serviços. A alta mobilidade do usuário de celular influencia diretamente os diversos mecanismos de administração do seu deslocamento. O usuário, em um sistema sem fio, pode se mover arbitrariamente, fazendo com que a eficácia dos mecanismos de controle dependa de quão adequados estão ao comportamento de mobilidade do usuário (Almeida 2002). A mobilidade do usuário traz consigo o deslocamento da informação. Sendo assim, um assunto a ser abordado neste trabalho é a disseminação da informação através do celular. Este surgimento permitirá, em um futuro bem próximo, que informações possam ser acessadas a qualquer instante e em qualquer lugar.

Novas idéias de análise do processo de mobilidade de um usuário no sistema de comunicação são fornecidas por diversos pesquisadores da área. Essas idéias proporcionam a construção de diferentes modelos de mobilidade existentes na literatura (Bar-Noy, Kessler Sidi 1995, Lam, Cox Widom 1997, Rubin Choi 1997, Zonoozi Dassanayake 1997b, Hong, Gerla, Pei Chiang 1999, Bettstetter 2001), que apresentam características que definem diferentes tipos de comportamentos de usuários móveis, bem como diferentes ambientes de simulação. Com essa diversidade de modelos existentes na literatura, a escolha do modelo a ser utilizado pelo pesquisador se torna uma missão difícil, pois a adoção de modelos mais simples ou modelos mais sofisticados dependerá de como serão caracterizados a mobilidade do indivíduo e o ambiente estudado. Um modelo cujas mudanças de direção são imprevisíveis pode ser considerado simples. Entretanto, um mais sofisticado pode caracterizar a escolha de direção de acordo com dados coletados de um cenário real (Almeida 2003).

O conceito de comunicações móveis utilizando uma rede celular nasceu em 1947, no *Bell Laboratories* do departamento de pesquisa da AT&T. A idéia inicial não era realizável devido a dificuldades na disponibilização de espectro de rádio por parte das autoridades. Mas a partir de 1960, a Bell Labs e a Motorola começaram a estudar o conceito e a procurar colocá-lo em prática. Em 1970, a *Federal Communication Commission* havia atribuído frequências para serem utilizadas em sistemas móveis de rádio em terra. A corrida ao celular foi vencida pela Motorola em 3 de abril de 1973. Martin Cooper, então gerente geral da Motorola, entrou para a história não só como sendo a primeira pessoa que fez a primeira chamada de um telemóvel no mundo através do protótipo Dyna-Tac, mas também por ser considerado como o inventor deste novo meio de comunicação.

A telefonia móvel foi introduzida no Brasil em 1972, por um sistema anterior à tecnologia celular, um sistema de baixa capacidade, com tecnologia *Improved Mobile Telephone System*. Em 1984, teve início a análise de sistemas de tecnologia celular sendo definido o padrão americano, analógico *Advanced Mobile Phone System* ou Sistema de Comunicação de Telefonia Celular.

1.1 Principais Considerações

Dado que parte essencial deste trabalho consiste em estudar processos aleatórios para analisar o comportamento da mobilidade de usuários em redes sem fio, nesta seção será

realizada uma revisão dos conceitos básicos associados.

1.1.1 Distribuições

Nesta seção será apresentado um resumo das principais distribuições de probabilidades importantes para este trabalho. Uma distribuição de probabilidade pode ser discreta ou contínua dependendo do valor assumido pela variável aleatória. Distribuições mistas e singulares não serão consideradas neste trabalho.

Seja X uma variável aleatória. Se o número de valores possíveis desta variável for finito ou infinito numerável, denomina-se X de variável aleatória discreta. Se a variável aleatória discreta X assumir um conjunto de valores X_1, X_2, \dots, X_n com probabilidades p_1, p_2, \dots, p_n , sendo $\sum p_i = 1$ e $p_i \geq 0$, com $i = 1, 2, \dots, n$, então tem-se definida uma distribuição de probabilidade de X .

Seja X uma variável aleatória. Se o número de valores possíveis desta variável for um intervalo ou uma coleção de intervalos, denomina-se X de variável aleatória contínua. A variável aleatória X é contínua se existe uma função $f(x) \geq 0$ tal que

$$F_X(x) = \int_{-\infty}^x f(t)dt$$

para todo $x \in \mathbb{R}^2$. Neste caso, diz-se que f é função de densidade de probabilidade de X , ou apenas função de densidade de X .

Sendo X uma variável aleatória, então o valor de $E(X - k)^r$, se existe, é chamado r -ésimo momento de X em torno de k , $r = 1, 2, 3, \dots$. O r -ésimo momento em torno do 0, EX^r , é chamado simplesmente de r -ésimo momento de X ou momento de ordem r de X . Se X é integrável, então o r -ésimo momento em torno da média existe e se chama r -ésimo momento central de X . O primeiro momento é a esperança, o primeiro momento central é nulo e o segundo momento central é chamado de variância de X .

Seja X uma variável aleatória discreta assumindo os seguintes valores: $0, 1, \dots, n, \dots$. Se a função de probabilidade de X é dada por

$$\Pr(X = k) = \frac{e^{-\lambda} \lambda^k}{k!}, \quad k = 0, 1, \dots, n, \dots, \lambda > 0,$$

diz-se, então, que X tem distribuição de Poisson, $X \sim P_o(\lambda)$.

Diz-se que uma variável aleatória X tem distribuição uniforme no intervalo $[a, b]$ se sua função de densidade for dada por

$$f_X(x; a, b) = \begin{cases} \frac{1}{b-a}, & a \leq x \leq b, \\ 0, & \text{caso contrario (c. c.).} \end{cases} \quad (1.1)$$

Outra distribuição mencionada neste trabalho é a generalização da família gama de variáveis aleatórias que foi proposta por Stacy (1962) e por Stacy Mihram (1965). A estrutura da função de densidade da variável aleatória X é

$$f_X(x; a, b, c) = \begin{cases} \frac{|c|}{b^{ac}\Gamma(a)} x^{ac-1} e^{-(x/b)^c}, & x \geq 0, \\ 0, & x < 0, \end{cases} \quad (1.2)$$

onde $a, b, c > 0$ e $\Gamma(a)$ indica a função Gamma. Nessa família estão incluídas outras subfamílias, como por exemplo a exponencial, a gama, a Weibull, entre outras. A Tabela 1 apresenta informações sobre distribuições baseadas na generalização da distribuição gama, estas informações foram obtidas a partir do artigo de Stacy Mihram (1965).

O r -ésimo momento de X é

$$E(X^r) = \begin{cases} \frac{b^r \Gamma(a+r/c)}{\Gamma(a)}, & r/c > -a, \\ \infty, & \text{c. c.,} \end{cases} \quad (1.3)$$

e, a partir da expressão (1.3) se obtêm a esperança e a variância de X . A Figura 1 apresenta uma representação gráfica da densidade da gama generalizada.

Uma variável aleatória X tem distribuição exponencial com parâmetro $\lambda \geq 0$, $X \sim \exp(\lambda)$, se ela tem função de densidade da forma

$$f_X(x; \lambda) = \begin{cases} \lambda e^{-\lambda x}, & x \geq 0, \\ 0, & x < 0. \end{cases} \quad (1.4)$$

O r -ésimo momento de X é

$$E(X^r) = \begin{cases} \frac{r}{\lambda^r}, & \lambda \geq 0, \\ 0, & \text{c. c.} \end{cases} \quad (1.5)$$

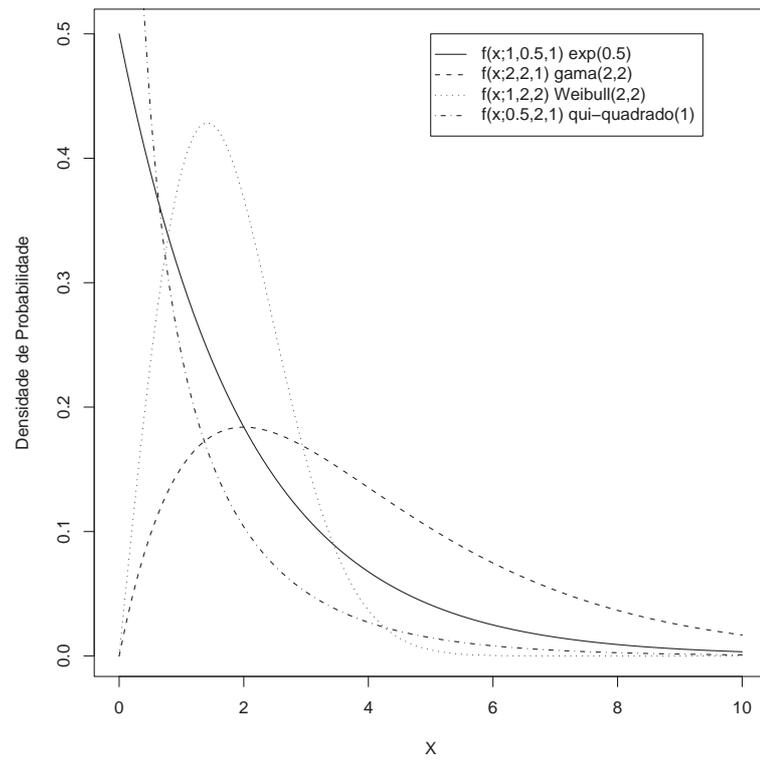


Figura 1: Formas assumidas pela densidade gama generalizada $f(x; a, b, c)$.

Tabela 1: Distribuições geradas a partir da gama generalizada $f(x; a, b, c)$.

Distribuição	Densidade
Exponencial	$f(x; 1, b, 1)$
Gama	$f(x; 1, b, c)$
Weibull	$f(x; a, 1, c)$
Qui-Quadrado(n)	$f(x; n/2, 1, 2)$
Qui(n)	$f(x; n/2, 2, \sqrt{2})$
Half Normal	$f(x; 1/2, 2, \sqrt{2})$
Normal Circular	$f(x; 1, 2, \sqrt{2})$
Normal Esférica	$f(x; 3/2, 2, \sqrt{2})$
Rayleigh($c > 0$)	$f(x; 1/2, 2, c\sqrt{2})$

A partir da expressão (1.5) se obtém a esperança e a variância de $X \sim \exp(\lambda)$.

Este é um caso especial da distribuição gama descrita em (1.2). A matemática associada à distribuição exponencial vem de uma natureza simples e é possível obter fórmulas explícitas. Por este motivo, modelos construídos a partir de variáveis exponenciais são algumas vezes usadas como uma representação aproximada de outros modelos apropriados porém difíceis de trabalhar. A Figura 2 apresenta uma representação gráfica da densidade exponencial para $\lambda = 1, 2$.

1.1.2 Processos Estocásticos

De maneira geral, pode-se dizer que um processo estocástico é um sistema onde se observa um fenômeno aleatório evoluir ao longo do tempo e que de alguma forma pode ser descrito por leis de probabilidade. Em termos matemáticos, pode-se dizer que um processo estocástico é uma coleção de variáveis aleatórias indexadas. Estatisticamente, um processo estocástico, ou processo aleatório, é formado por uma coleção de variáveis aleatórias definidas em um mesmo espaço de probabilidade $(\Omega, \mathcal{A}, \Pr)$, geralmente representado por $\{X_t\}_{t \geq 0}$ onde t na maioria das vezes representa o tempo e X_t é uma variável aleatória chamada de estado do processo no instante t . Os possíveis valores de t formam um conjunto de índices, ou espaço paramétrico do processo estocástico. Para os propósitos deste trabalho, é suficiente considerar processos estocásticos indexados pelo tempo t , isto é, $\{X_t\}_{t \geq 0}$, podendo ser o tempo discreto ou contínuo.

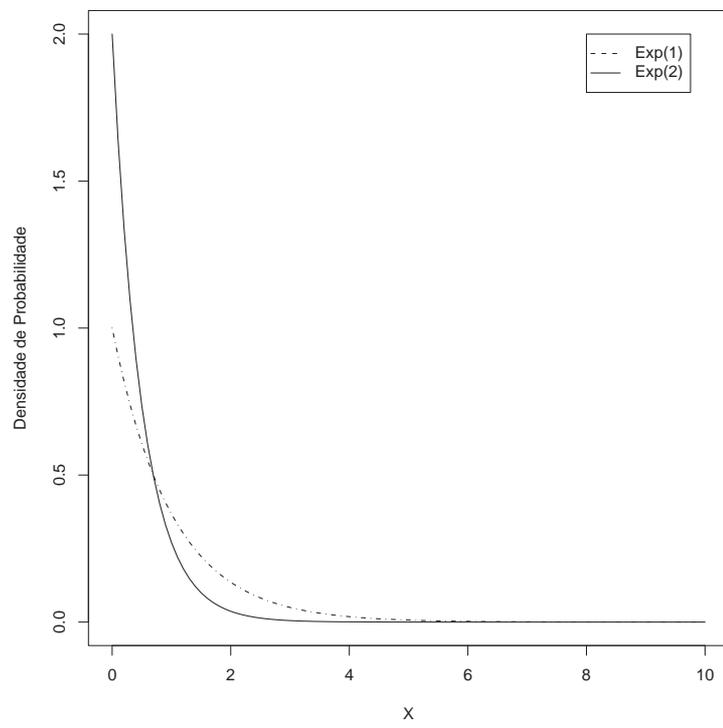


Figura 2: Formas assumidas pela densidade exponencial.

Um processo estocástico $\{X_t\}_{t \geq 0}$ é um processo contínuo, ou processo com parâmetro contínuo, se o conjunto de valores de t é um intervalo (finito ou infinito) de números reais. Ao contrário, se o mesmo é um conjunto finito ou contável, por exemplo, $t = 1, 2, 3, \dots$, diz-se que o processo estocástico é um processo discreto, ou processo com parâmetro discreto.

O espaço de estados de um processo estocástico é o conjunto de todos os valores possíveis da variável X_t .

A diversidade entre contínuo e discreto também pode ser aplicada à variável aleatória X_t , isto é, ao estado do processo. O espaço de estados de um processo estocástico pode ser discreto ou contínuo, se a variável aleatória X_t for discreta ou contínua, respectivamente, ou seja, se os estados do processo forem discretos ou contínuos. Então, a combinação dos tipos de espaço paramétrico (discreto ou contínuo) e do espaço de estados (discreto ou contínuo) fornece quatro classes de processos estocásticos: processo discreto com espaço de estados discreto, processo contínuo com espaço de estados discreto, processo discreto com espaço de estados contínuo e processo contínuo com espaço de estados contínuo.

Muitos sistemas têm a seguinte propriedade: conhecendo-se o estado atual do sistema, os estados passados não têm influência sobre os estados futuros. Esta propriedade é chamada de propriedade markoviana (de primeira ordem), e sistemas com esta característica são descritos por processos estocásticos markovianos. Matematicamente, esta propriedade é definida por

$$\Pr [X_{t_{n+1}} = i \mid X_{t_1} = j_1, X_{t_2} = j_2, \dots, X_{t_n} = j_n] = \Pr [X_{t_{n+1}} = i \mid X_{t_n} = j_n], \quad (1.6)$$

para todo t , onde, $t_1 < t_2 < \dots < t_{n+1}$.

Um processo estocástico é dito markoviano se, dado o valor de X_t , o valor de X_s , onde $s > t$, não depende dos valores de X_u , onde $u < t$. Ou seja, um processo é markoviano se o seu comportamento no futuro só depende de seu estado atual e as probabilidades dos estados futuros não são alteradas pelo conhecimento adicional do comportamento passado do processo. Um processo markoviano apresenta uma certa “falta de memória”, pois a distribuição condicional do estado no futuro depende apenas da informação mais recente.

Um processo estocástico $\{X_t\}_{t \geq 0}$ é dito markoviano se a propriedade markoviana (1.6) é satisfeita. Um processo Markoviano com espaço de estados finito ou contável é uma cadeia markoviana.

A probabilidade de transição do sistema estar no estado i no momento $t + 1$ dado que no

momento t esteve no estado j é denotada por

$$\Pr [X_{t+1} = i \mid X_t = j] = P_{t+1,t}(j, i),$$

ou seja, esta é a probabilidade da passagem do estado j (no instante t) para o estado i (no instante $t + 1$). A notação usada enfatiza o fato de que esta probabilidade pode ser função dos instantes em que ocorre a transição.

Um dos mais importantes e fundamentais processos estocásticos é o processo de Poisson $\{N_t\}$. Ele conta o número de ocorrências de um determinado evento instantâneo o qual se realiza em uma unidade de tempo. Os eventos instantâneos são comuns e acontecem aleatoriamente no tempo. Para que o processo de Poisson possa ser visto como um modelo probabilístico é necessário que as três hipóteses abaixo sejam validadas.

Hipótese 1 A probabilidade de chegada de um evento em estudo no intervalo $(s, s + t)$ depende somente de t e não de s . Em outras palavras, a probabilidade de exatamente k eventos chegarem durante um período de duração t depende apenas de t e não do momento exato que o evento ocorreu. Embora esta hipótese não seja em geral satisfeita na prática, ainda sim é uma boa aproximação durante curtos períodos de tempo.

Hipótese 2 Os números de eventos durante intervalos de disjuntos de tempo são independentes. Significa dizer que os números de eventos ocorridos em intervalos de tempo são independentes se a intersecção entre dois intervalos de tempo for vazia.

Hipótese 3 Os eventos ocorrem sozinhos e não simultaneamente. Ou seja a probabilidade de terem ocorrido dois ou mais eventos em $(0, t]$ dado que ocorreram um ou mais eventos em $(0, t]$ tende a zero quando $t \rightarrow 0$.

Em particular, os eventos instantâneos que o processo de Poisson conta são eventos que compõem a mobilidade do usuário de celular e que são verificados a cada unidade de tempo. Os eventos instantâneos são comuns e acontecem aleatoriamente no tempo.

1.2 Suporte Computacional

Esta seção contém uma apresentação sucinta dos softwares utilizados para desenvolver este trabalho.

RSI é um provedor de visualização de dados de alto-desempenho e possui soluções de análise inclusive de softwares. David Stern fundou RSI como um sistema de pesquisa em 1977. O software IDL foi o primeiro produto da companhia e se tornou o principal ambiente de desenvolvimento por processar e visualizar dados grandes e complexos. Pela primeira vez, os cientistas e investigadores poderiam escrever os próprios algoritmos analisar e exibir dados. Os procedimentos numéricos envolvendo as simulações apresentados neste trabalho foram realizados utilizando-se a versão 5.4.

O IDL é um ambiente de trabalho completo para análise e visualização interativa de dados de qualquer natureza, combinando o poder de uma linguagem de quarta geração com avançadas ferramentas de análise matemático-estatística e de representação gráfica.

Optou-se em escolher o software IDL, pois ele permite implementações de técnicas estatísticas com facilidade e de atender a requisitos como precisão numérica e eficiência. Todas as simulações foram realizadas nos sistemas operacionais *Windows 98* e *Windows ME*.

O ambiente e linguagem de programação *R* foi desenvolvido nos Laboratórios de Sino por John Chambers entre outros pesquisadores. Os procedimentos gráficos apresentados neste trabalho foram realizados utilizando-se a versão 1.6.1, que é a mais atual e está disponível gratuitamente para uso acadêmico no endereço <http://www.r-project.org>.

Além destas duas linguagens de programação, foi utilizada a linguagem de tipografia \LaTeX para a elaboração do texto desta dissertação de mestrado. A opção por esta linguagem baseia-se principalmente na flexibilidade e na qualidade de apresentação. A versão mais atual do \LaTeX para a plataforma *Windows* pode ser obtida gratuitamente no endereço <http://www.latex-project.org/>. O estilo utilizado para desenvolver esta dissertação foi o *abn-TeX*. Ele é um estilo que cria macros para \LaTeX que automatizam ao máximo a formatação da tese, dissertação ou monografia de acordo com as normas ABNT.

1.3 Organização do Trabalho

O restante deste trabalho está dividido em cinco capítulos. O Capítulo 2 apresenta uma breve descrição da arquitetura de uma rede móvel celular, seus componentes básicos e o funcionamento da rede. Alguns modelos de mobilidade são descritos, bem como as definições necessárias para a compreensão dos mesmos.

Já o Capítulo 3 comportará a descrição do modelo de mobilidade. Neste capítulo foram expostos os processos estocásticos responsáveis pela mobilidade dos usuários. Os processos de controle de velocidade e direção, propostos por Bettstetter (2001), formam o processo de mobilidade. Um outro processo foi proposto por este trabalho, o processo de contágio.

No quarto capítulo será apresentada a descrição do estudo realizado, bem como do ambiente utilizado para simular a circulação de pedestres portadores de aparelhos celulares.

O Capítulo 5 consiste de várias simulações de duas situações. Com as informações extraídas é realizada uma análise. Ao final do sexto capítulo será dada uma conclusão geral da dissertação.

2 Principais Modelos de Mobilidade

O levantamento bibliográfico de estudos realizados na área de modelagem de mobilidade de usuários em redes de comunicação móvel celular é uma das contribuições fornecidas por este trabalho. Muitos destes estudos trazem sugestões para modelar o comportamento de movimentos de usuários de uma rede móvel celular, porém, segundo Zonoozi Dassanayake (1997b) são poucos os que buscam relatar em detalhes esse comportamento de movimento.

A Seção 2.1 descreve alguns conceitos a respeito da arquitetura de uma rede de comunicação móvel celular, bem como seus elementos básicos. A fim de esboçar sobre quais categorias se enquadram os modelos de mobilidade a serem estudados é que a próxima seção foi proposta; na Seção 2.3 serão vistos os principais modelos de mobilidade encontrados na literatura, em função das várias categorizações.

2.1 Arquitetura de uma Rede Móvel Celular

Nesta seção serão descritos os elementos básicos para o funcionamento de uma rede de comunicação móvel. A Figura 3 apresenta os elementos e suas entidades funcionais.

Os mais populares sistemas sem fio são os sistemas celulares. Muitos conceitos são particulares e outros excedem esta área. Segundo Mateus Loureiro (1999), o termo sistema móvel celular surgiu a partir de sua estrutura em células, que consiste em uma área geográfica atendida ou coberta por unidades de rádio com transmissores, receptores, antenas e torres, além de uma unidade de controle. Chamamos este conjunto de estações de rádio-base, responsáveis pelo controle, monitoramento e supervisionamento de chamadas de/para um móvel dentro de sua área de cobertura. Em outras palavras, cada estação rádio-base possui uma antena que é responsável pela comunicação em uma determinada área e por um número determinado de

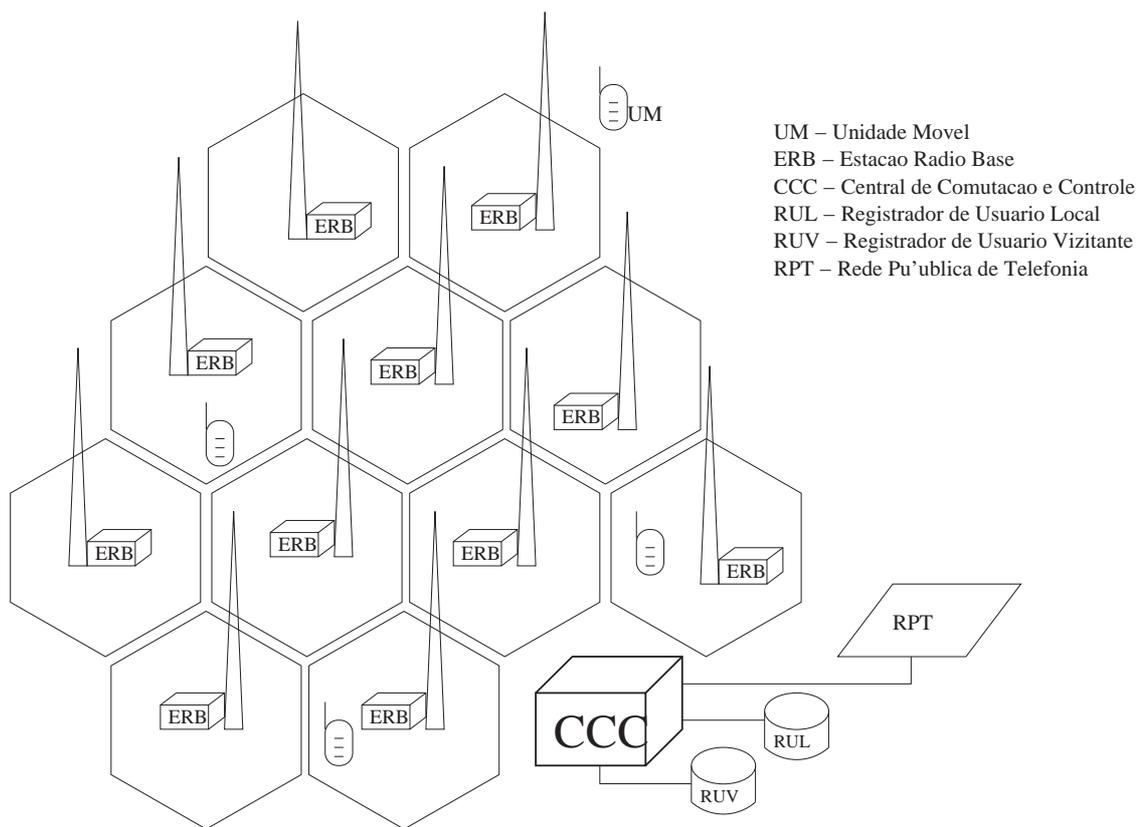


Figura 3: Arquitetura celular.

ligações (chamadas telefônicas recebidas ou transmitidas).

As antenas são posicionadas para cobrir a maior área possível, a fim de atender à demanda originada pelos usuários de dispositivos portáteis que transmitem e recebem sinais de rádio e que podem se movimentar dentro de toda a região de cobertura. Estes dispositivos podem ser chamados de móveis, usuários de celulares ou simplesmente usuários. Portanto, móvel é a interface entre o cliente assinante da rede celular e as estações rádio-base.

Conforme pode-se observar na Figura 4, a área de abrangência de uma estação rádio-base corresponde a todos os pontos onde o sinal de rádio pode ser recebido dentro de limites de ruídos e interferências aceitáveis. Por este motivo as células não têm forma definida, podendo assumir formas totalmente irregulares dependendo do relevo e da topografia da área, mas por conveniência são representadas por hexágonos. Alguns pontos podem ser cobertos por mais de uma estação rádio-base, o que gera uma sobreposição entre as células. À primeira vista, isto pode parecer um inconveniente ao sistema, mas na realidade isto é uma grande oportunidade

de pesquisa, pois muitos trabalhos podem ser desenvolvidos nesta área (Guedes 1997).

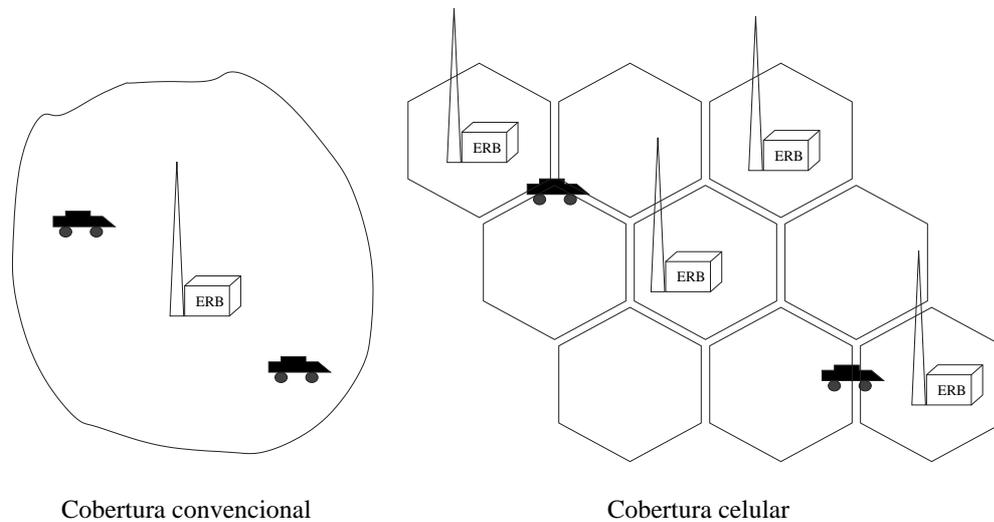


Figura 4: Região de cobertura.

A conexão entre uma estação rádio-base e um usuário se realiza por uma frequência ou canal disponível. Nos antigos sistemas sem fio, cada usuário possuía um canal específico, mas os atuais sistemas disponibilizam canais para todos os usuários da célula. Os mesmos são liberados por ordem de chegada dos usuários e são atendidos tantos quantos forem os canais disponíveis na estação rádio-base. Com isso, surgiu a importância de uma alocação eficiente de frequências entre as estações. Cada estação rádio-base é conectada a uma linha física dedicada à uma central de comutação e controle que, por sua vez, também é conectada à rede pública de telefonia.

A central de comutação e controle é responsável pela interligação e controle de várias estações rádio-base, bem como pelo monitoramento e/ou mudança automática da chamada de uma célula para outra à medida que o usuário se desloca. Segundo Cavalcanti (2001), as células coordenadas por uma central de comutação e controle formam uma região chamada de área de serviço.

A área de serviço que possui informações sobre os dados cadastrais de um determinado usuário é conhecida como área de serviço local e, caso o mesmo esteja em sua área de serviço, ele é chamado de *home subscriber* ou usuário local. As informações referentes ao perfil do usuário local são obtidas a partir de um banco de dados interno que contém os seus dados cadastrais. Este banco de dados é conhecido como registrador de localidade interno.

Por outro lado, se o usuário se deslocar para uma outra área de serviço, ele passa a ser chamado de *roamer subscriber* ou usuário visitante. Esse processo de deslocamento entre áreas de serviço, como por exemplo a mudança de área metropolitana, exige que as chamadas sejam redirecionadas de uma área para outra e este redirecionamento de chamadas recebe o nome de *roaming*.

Quando ocorre o *roaming*, para que o usuário visitante possa ser identificado é necessário que exista outro banco de dados que forneça informações a seu respeito, como o seu número de identificação (*mobile identification number*) por exemplo. Este banco de dados, conhecido como registrador de localidade visitante, aloca temporariamente os dados do usuário visitante, os quais são fornecidos pelo registrador de localidade interno. Este intercâmbio de informações entre os bancos de dados de ambas as áreas de serviço ocorre para melhor suportar o *roaming*, podendo assim diminuir o tráfego de sinalização entre elas e reduzir o tempo de estabelecimento de uma chamada, pois quando um usuário visitante se registra em uma área de serviço o seu perfil é copiado para o registrador de localidade visitante.

Existem alguns procedimentos que caracterizam o funcionamento de uma rede móvel. Um dos procedimentos estudados por diversos pesquisadores (Bates 1994, Feher 1995, Alencar 1999, Cavalcanti 2001) é o de *handoff* ou *handover*. Este procedimento permite manter a continuidade de uma ligação quando um usuário passa de uma célula para outra, sendo então liberado o canal de comunicação da célula de origem e alocado um novo canal para a ligação do usuário na célula de destino. Em outras palavras, o procedimento de *handoff* caracteriza-se pela transferência de uma chamada em andamento de um canal de comunicação de uma estação rádio-base para a estação destino. A Figura 5 mostra dois móveis conectados à rede se deslocando de uma estação rádio-base para outra, um efetuando o procedimento de *handoff* e o outro o procedimento de *roaming*.

Dependendo do tempo entre a liberação do canal na célula de origem e do estabelecimento da conexão com a célula de destino do *handoff*, ele pode ser dividido em dois tipos. Caso o usuário chegue a passar um intervalo de tempo pequeno sem estar conectado com a estação rádio-base de origem nem com a de destino, então este tipo de *handoff* é conhecido como *hard handoff*. Porém, se o móvel se conectar com a estação rádio-base de destino sem que sua conexão com a estação origem seja interrompida, ficando assim por um curto espaço de tempo ligado às duas estações, têm-se outro tipo de *handoff*, o chamado *soft handoff*. O maior problema observado no *hard handoff* são as possíveis descontinuidades que podem

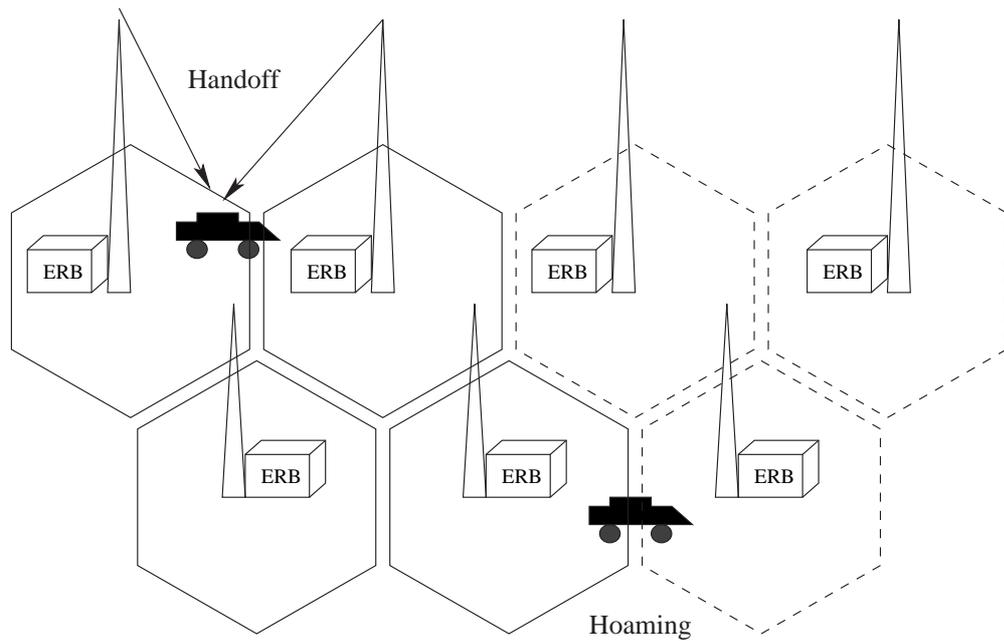


Figura 5: Procedimento de *handoff* e *roaming*.

ocorrer durante a transmissão de dados, pois neste caso, pode gerar retransmissões de dados, o que acarretaria em um maior congestionamento da rede. Diferente do *hard handoff*, o *soft handoff* evita a descontinuidade da conversação na ligação. Entretanto, se a nova estação rádio-base não possuir nenhum canal livre para a ligação de *handoff*, ou seja, se os canais estiverem todos ocupados, a ligação será forçada a terminar, caracterizando uma ligação de *handoff* bloqueada e conseqüentemente a queda da ligação, isto é, a ocorrência de um *handoff* mal sucedido.

A eficiência no atendimento de uma chamada em um sistema de comunicação móvel está diretamente ligada à rápida localização do usuário chamado dentro do sistema. Como o usuário muda de localização à medida que ele se move pela rede, têm-se então problemas relacionados a gerência de localização. Estes problemas são tratados através de um outro procedimento bastante utilizado pelos sistemas de comunicação móvel conhecido como *paging*. Este procedimento tem por objetivo realizar a localização do usuário quando é feita uma ligação para o mesmo, ou seja, ele torna o sistema capaz de localizar o usuário, notificá-lo da chamada através de um alarme, mensagem de voz ou mensagens alfa numéricas, e conectá-lo à ligação recebida.

Nos casos em que a rede não dispõe de informações sobre a atual localização do usuário

no momento em que chega uma chamada, é necessário o envio de mensagens de *paging* para toda região coberta pela rede, gerando um grande tráfego de sinalização. Para haver uma redução deste tráfego, a área de cobertura é subdividida em vários grupos de áreas de localização, conhecidos como áreas de registro de localização. Estes grupos recebem as mensagens enviadas pelo usuário a fim de atualizá-lo quanto à sua posição. Estes envios de informações são conhecidos como mensagens de *location update* ou atualização de localização. Portanto, se o *location update* ocorrer dentro de uma das células que compõem as várias áreas de registro de localização, então será possível obter uma correta localização do usuário, sem que seja necessário o envio de mensagens de *paging* para toda a área de cobertura. Por exemplo, nas situações em que não é possível a localização do usuário dentro de uma determinada célula, as mensagens são enviadas para as células vizinhas da mesma área de registro de localização. Caso ainda não se obtenha sua localização, estas mensagens são mais uma vez enviadas para outras áreas de registro de localização.

O que se percebe claramente é que existe uma relação entre os tráfegos de mensagens de *paging* e de *location update* com o tamanho da área de localização. Se o número de células contidas na área de localização for pequeno, então o tráfego de mensagens de *paging* será pequeno, enquanto que o de *location update* será grande. Em contrapartida, se o número de células na área de localização for grande, então o tráfego de mensagens de *paging* será intenso, e o de *location update* será pequeno (Alencar 1999). Quanto ao número de células existentes em cada área de localização, o trabalho desenvolvido por Tabbane (1997) apresenta um estudo de qual seria o menor número de células possíveis. Já os autores Bar-Noy et al. (1995) mostram uma otimização do procedimento de *location update* realizado pelo usuário.

2.2 Categorização de Modelos de Mobilidade

Para poder otimizar o uso de recursos existentes em sistemas de comunicação móvel, bem como para fazer um planejamento dos requerimentos de infra-estrutura, é que os mesmos são agrupados em seis grandes categorias. São elas os sistemas de telefonia sem fio (*cordless telephony*), os sistemas celulares, os sistemas de *paging*, os sistemas de comunicação de dados móvel LAN e WAN e os sistemas via satélite. Em se tratando dos sistemas celulares, existe uma grande variedade de descrições de mobilidade úteis em diversos cenários ou aplicações. O trabalho de Bettstetter (2001) faz uma apresentação sucinta dos principais modelos

empregados para descrever a mobilidade de usuários de sistemas de comunicação móvel. Um modelo de mobilidade pode possuir vários tipos de características, tais como o nível de detalhamento, a dimensão, o tipo de aplicação e o grau de aleatoriedade.

O nível de detalhamento se refere às maneiras de se observar um cenário. Tais maneiras ou escalas são denominadas nano, pico, micro, meso e macromobilidade, entretanto as mais diretamente relacionadas com este trabalho são a micro e a macromobilidade. A micromobilidade consiste em uma visão detalhada de um cenário, tipicamente em escalas de até metros, enquanto que a macromobilidade expõe o cenário de maneira mais superficial. Em outras palavras, de acordo com a Figura 6 percebe-se que a micromobilidade analisa o comportamento de usuários de celulares em uma estrutura de rua, enquanto que a macromobilidade analisa o comportamento dos mesmos em uma estrutura mais abrangente, como a de um bairro inteiro ou de uma cidade. A visão microscópica observa a localização exata de um usuário, enquanto a visão macroscópica oferece a localização do mesmo em uma certa região.

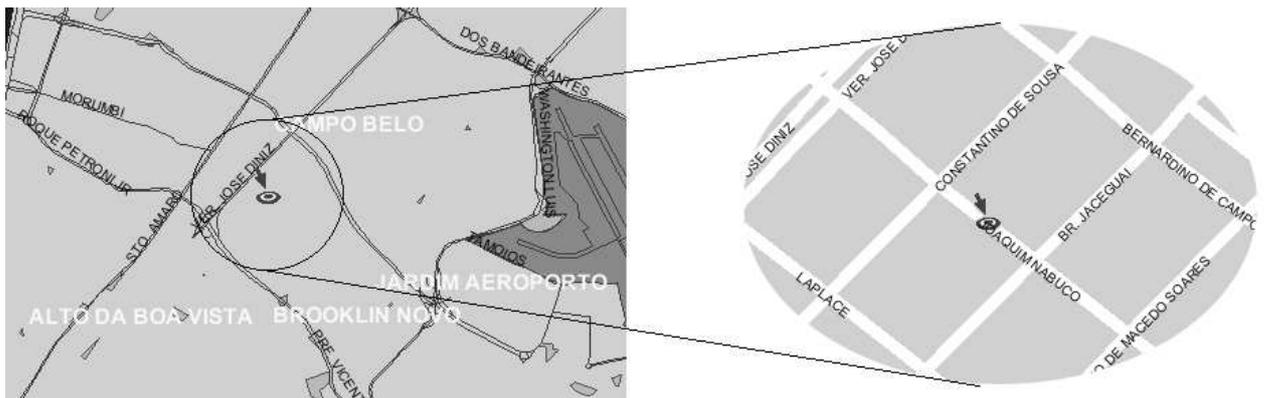


Figura 6: Escalas de visualização.

Quanto à dimensão, existem três principais abordagens utilizadas em modelos de mobilidade. A primeira abordagem refere-se ao usuário que se move apenas em uma direção, utilizando-se então uma única dimensão, como por exemplo o deslocamento em um único eixo cartesiano. A segunda abordagem refere-se ao usuário que se encontra em um ambiente de rua, o qual pode caracterizar-se por possuir duas dimensões. Por fim, a terceira abordagem refere-se ao usuário que se move em um edifício, onde é dado ao mesmo a permissão de subir ou descer andares, fazendo com que o modelo passe a possuir três dimensões; Figura 7.

Considerando agora o tipo de aplicação, segundo Bettstetter (2001) existem dois tipos: os modelos analíticos e os modelos usados em estudos de simulação. Os modelos analíticos

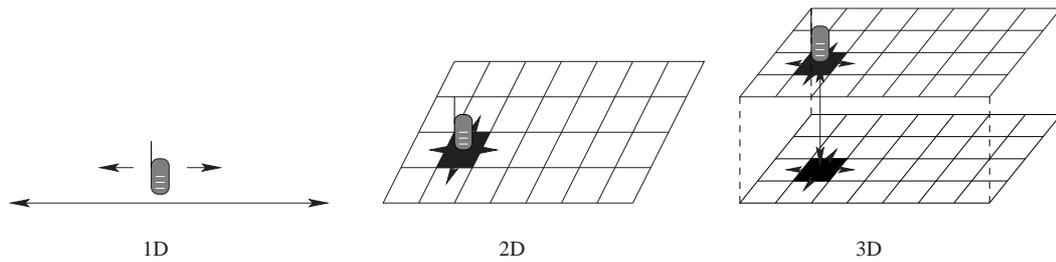


Figura 7: Dimensão.

são, em geral, baseados em suposições bastante simples relativas ao movimento do usuário. Vários autores utilizam os modelos analíticos a fim de calcular expressões matemáticas e estatísticas, no caso em que se deseja estudar o tempo de permanência de usuários em uma determinada região celular.

Quanto aos modelos usados em estudos de simulação, estes descrevem o movimento do usuário de maneira mais detalhada. Para esta última situação não se dispõe, geralmente, de expressões determinísticas de utilidade. Dentre as várias caracterizações de modelos de mobilidade citadas anteriormente, a mais interessante para este trabalho é a que os divide em determinísticos, estocásticos e híbridos, que é chamada *caracterização por grau de aleatoriedade*. Os primeiros utilizam trajetórias reais observadas na prática, enquanto os segundos procuram caracterizar o comportamento através de processos estocásticos. Os modelos híbridos, muitas vezes chamados de modelos aleatórios com restrições, incorporam ambos os tipos de modelos.

Para realizar uma modelagem realista do comportamento do movimento do usuário, a sua velocidade e direção não poderão ser descritos através de um processo determinístico, pois o caminho do móvel possui uma trajetória aleatória e, para traçar esta trajetória, é requerida uma formulação sistemática das relações matemáticas e estatísticas envolvidas entre o móvel, a região celular e o tipo de ambiente em que o mesmo se encontra, seja o ambiente fechado (*indoor officer*), aberto (*outdoor pedestrian*), ou veicular (*vehicular environment*). O primeiro representa um ambiente fechado do tipo escritório. O seguinte pode ser compreendido como sendo um ambiente de rua. O *vehicular environment* representa um ambiente cujos veículos são o meio de transporte dos usuários. Estes tipos de ambientes podem ser encarados como escalas de visualização do móvel.

Utilizando as caracterizações mencionadas anteriormente, analisa-se o modelo de mo-

bilidade de rastros ou *Mobility Traces*, que, segundo Lam et al. (1997), são registros de movimentações de alguns segmentos de populações em determinadas áreas geográficas. Entretanto, rastros de grandes populações e grandes áreas geográficas são difíceis de seguir. Do ponto de vista da área em questão, este tipo de modelo consiste em registrar os movimentos de usuários em uma pequena rede de comunicação móvel. O *Mobility Traces* possui limitações. Uma delas é que para o referido modelo não se dispõem de ferramentas estatísticas e matemáticas satisfatórias, dificultando a previsão da mobilidade de usuários na rede. Por mais que os pesquisadores da área busquem informações de como utilizar este modelo para grandes áreas geográficas ou grandes sistemas de rede (Toh 1996), foram obtidos apenas resultados de estudos de pequenas redes. O estudo feito em *Project Sumatra* (1997) mostra alguns resultados de simulações computacionais utilizando este modelo.

Um outro exemplo de modelo de mobilidade é o desenvolvido por Lam, Jannink, Cox Widom (1996) e por Lam et al. (1997). Estes pesquisadores descreveram um modelo para a estrutura de tráfego em serviços de comunicações pessoais. Esta estrutura é composta por três componetes: modelo topológico ou *topology model*, modelo de chamada ou *call model* e modelo de movimento ou *movement model*. O modelo topológico descreve a área geográfica onde o móvel está localizado, ou seja, apenas considera as relações de posição dos usuários descrevendo seus ambientes geográficos. Já os modelos de chamadas e de movimento descrevem, respectivamente, como o usuário faz para chamar um outro usuário e como eles se movem dentro da área geográfica definida pelo modelo topológico.

Uma outra característica deste modelo proposto é que ele usa outros tipos de escalas, que não chegam a diferir muito das descritas acima. São diferentes escalas desenvolvidas de forma hierárquica chamadas de metropolitana, nacional e internacional. O modelo de mobilidade que envolve a escala metropolitana descreve o movimento do usuário dentro do centro urbano, enquanto que a nacional e a internacional descrevem o comportamento de movimentos agregados. Como exemplo dessas escalas pode-se citar o modelo proposto por Lam et al. (1997), que faz seus estudos baseados nos dados obtidos em *Origin and destination survey, T-100 domestic market data* (1991-1993) e *International air traffic between United States and other countries* (1996), onde se pode afirmar que a escala nacional caracteriza o comportamento do movimento entre áreas metropolitanas nos Estados Unidos da América, e a escala internacional caracteriza o comportamento do movimento entre os Estados Unidos da América e dez outros países.

Analisando o modelo de busca citado em Sanchez (1998) e em Iyer (2001), observa-se que ele é utilizado para estudos realizados em simulações. O modelo estuda o comportamento do movimento de um grupo de móveis com um objetivo em comum. Segundo Iyer (2001), a situação a ser simulada consiste em um conjunto de robôs tentando capturar um único robô que age como um alvo (Figura 8); outra situação seria a de simular equipamentos de localização. Em Sanchez (1998), a situação analisada consiste em tentar representar a mobilidade de móveis como uma estratégia de perseguição. Este modelo baseia-se no fato de se desejar estudar comportamentos de móveis em grupos. O comportamento da mobilidade deste modelo será melhor descrito na Seção 2.3.3.

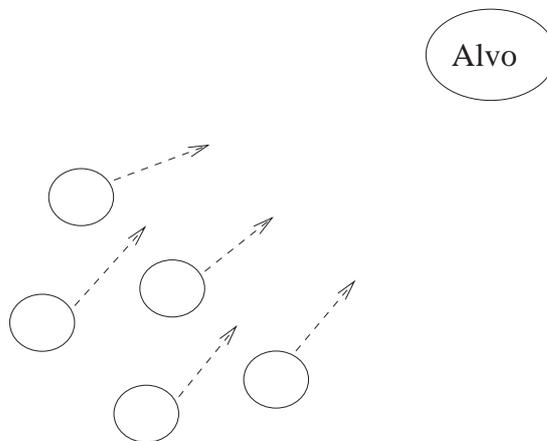


Figura 8: Exemplo de um modelo de busca.

Em Thomas, Gilbert e Mazziotto (1988), os autores apresentam o modelo de fluido que se baseia no modelo de movimento macroscópico. O modelo de fluido se caracteriza por retratar o movimento do usuário em um ambiente celular como se fosse um líquido se espalhando em uma superfície plana; Figura 9. Este modelo segue algumas suposições, como por exemplo a movimentação de um determinado usuário é independente de qualquer outro e cada um possui uma distribuição $U(0, 2\pi)$ para a escolha da direção. Apesar de bastante usado por pesquisadores da área de sistemas de comunicação móvel, o modelo de fluido apresenta algumas limitações como, por exemplo, nos casos em que a mobilidade de usuários é observada em uma região onde as ruas ou avenidas não são perpendiculares e uniformemente espaçadas entre si, o modelo de fluido não consegue descrevê-la com precisão (Seskar, Holtzman, Maric e Wasserman 1992).

Assim como este modelo, existem outros na literatura. Nas próximas seções serão des-

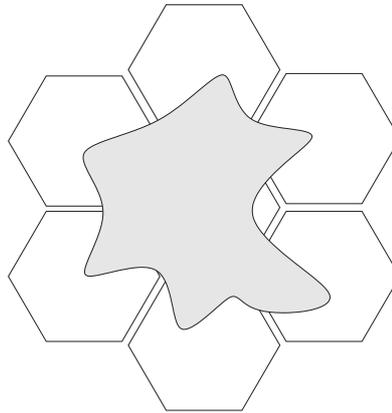


Figura 9: Exemplo do modelo de fluido.

critos alguns modelos em mais detalhes.

2.3 Exemplos de Modelos de Mobilidade

A mobilidade é uma das principais características dos sistemas de comunicação celular. Nesta seção serão descritos alguns dos mais relevantes modelos de mobilidade que são de importância para este trabalho. Inicialmente, será descrito o modelo browniano, seguindo a abordagem apresentada em Karlin Taylor (1975). Em seguida, será apresentado o modelo de mobilidade celular que utiliza o modelo markoviano para modelar o comportamento do movimento dos usuários. Por fim, será definido através de Hong et al. (1999) o modelo de mobilidade em grupo.

2.3.1 Modelo Browniano

Historicamente, o movimento browniano surgiu como uma tentativa de estudar fenômenos físicos. Hoje, o processo de movimento browniano em muitas de suas generalizações e extensões resultou em inúmeras e diversas áreas de ciências puras e aplicadas, tais como economia, teoria da comunicação, ciência da administração, e estatística matemática. Segundo Karlin Taylor (1975), o processo browniano é o mais famoso e o primeiro historicamente investigado na sua totalidade. O movimento browniano foi descoberto como um fenômeno físico por um botânico inglês chamado Brown em 1827. Ele observou que pequenas partículas imersas em um líquido apresentavam um movimento irregular permanente.

Uma descrição matemática deste fenômeno foi desenvolvida a partir das leis físicas formuladas por Albert Einstein em 1905. Desde então, o tema teve um progresso considerável. A teoria física foi aperfeiçoada por Smoluchowski, Fokker, Plabck, Burger, entre outros. A teoria matemática foi lentamente desenvolvida, pois extrair descrições matemáticas do modelo era difícil, tendo sido algumas das questões colocadas pelos físicos respondidas de maneira simples e intuitiva. Muitas destas respostas foram obtidas heurísticamente pela dissertação de Bachelier, em 1900. A formulação matemática concisa da teoria foi dada pela dissertação e pelos artigos de Wiener em 1918.

O movimento browniano, segundo Brown, consiste no movimento irregular e permanente de pequenas partículas imersas em um líquido. Trazendo este conceito para a área da comunicação móvel, o movimento browniano é um dos modelos possíveis para descrever o movimento (aleatório) de usuários dentro da rede móvel. Com a existência de uma formulação matemática concisa, este movimento pode constituir o modelo base para os diversos modelos de mobilidade. Entretanto, esse modelo não retrata de forma real tipicamente o movimento de usuários de redes sem fio.

O que se verifica é que dependendo da situação a ser simulada o movimento browniano pode ser caracterizado como um modelo unidimensional ou bidimensional. A escala unidimensional é a mais utilizada por pesquisadores. Outra característica observada é que ele pode ser considerado um modelo estocástico e pode, ainda, ser visto como um modelo nanoscópico.

O *Random Walk Mobility Model* ou modelo de mobilidade de caminho aleatório é um exemplo de um modelo construído a partir do browniano. Assim como o browniano, este modelo descreve movimentos irregulares contínuos (Davies 2000). Neste modelo, um usuário se move a partir de sua localização atual para a localização alvo alterando sua direção e sua velocidade, que são ambas escolhidas de acordo as distribuições preestabelecidas, sendo uma $U(v_{\max}, v_{\min})$, com $0 < v_{\min} < v_{\max} < \infty$, e a outra $U(0, 2\pi)$, respectivamente.

Para se alterar a velocidade e a direção do usuário é preciso que o intervalo de tempo constante t ou a distância constante a ser viajada terminem. No primeiro caso, o usuário muda de velocidade e de direção assim que se encerra o intervalo de tempo t_0 (Figura 10), enquanto que no segundo caso ao fim de um número predeterminado de passos é que o usuário muda sua direção e velocidade; Figura 11.

O *Random Walk Mobility Model* é um modelo de mobilidade comumente usado (Bar-Noy

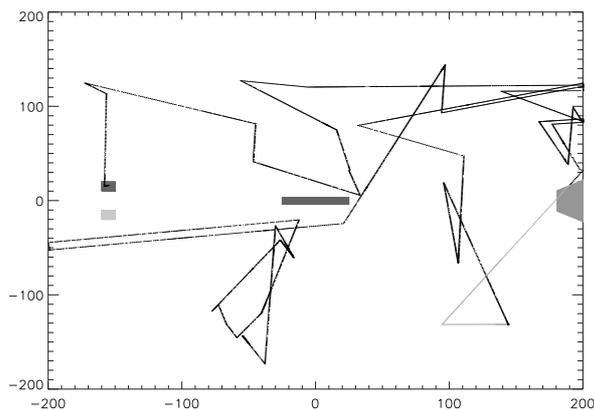


Figura 10: Mobilidade de um usuário usando o tempo para alterar a velocidade e direção.

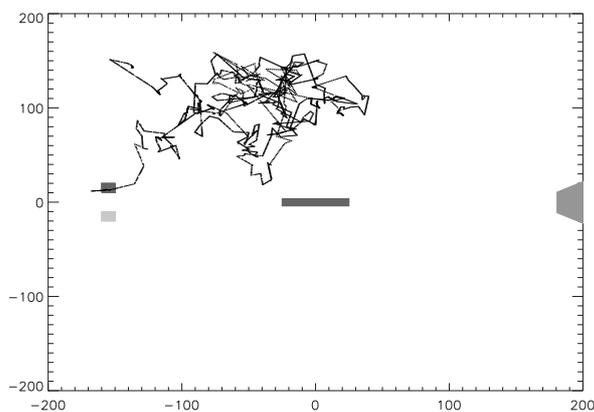


Figura 11: Mobilidade de um usuário usando a direção para alterar a velocidade e direção.

et al. 1995, Rubin Choi 1997, Zonoozi Dassanayake 1997b) e algumas vezes é referenciado como modelo de mobilidade Browniano. Este modelo é considerado por alguns pesquisadores um modelo de mobilidade sem memória, pois o mesmo não retém os valores da posição e da velocidade no instante anterior. Segundo Hong et al. (1999), neste modelo a velocidade e a direção correntes do usuário são independentes dos valores passados. Esta característica pode gerar movimentos não realistas, tais como paradas inesperadas ou curvas bruscas; Figura 10. Uma outra questão observada por alguns pesquisadores é que se o tempo ou a distância especificados para a mobilidade de um usuário for pequeno, então o espaço percorrido pelo o mesmo dentro da área de simulação será reduzido a uma pequena parte da área; Figura 11.

Outro exemplo de modelo muito popular, e também as vezes referenciado por modelo de mobilidade browniano, é o *Random Waypoint Mobility Model*. Segundo Bettstetter, Hartenstein Pérez-Costa (2002), este modelo é um modelo estocástico simples e direto que descreve o comportamento do movimento de um usuário. Ele é uma extensão do *Random Walk Mobility Model*; o que diferencia os dois modelos é o fato do *Random Waypoint Mobility Model* incluir um tempo de pausa entre as mudanças de direção e/ou velocidade. Uma vez terminado o tempo de pausa, as novas direção e velocidade são escolhidas de acordo suas respectivas funções de distribuições, tais funções podem ser descritas como as apresentadas acima para o *Random Walk Mobility Model*. Em Bettstetter et al. (2002) observa-se também que o movimento de um usuário a partir da posição inicial para uma próxima posição é chamado de período de movimento; neste artigo são apresentados derivações analíticas de algumas propriedades fundamentais dos processos estocásticos existentes. O modelo de mobilidade aleatório, como muitas vezes é também chamado, possui várias extensões na literatura; uma delas será abordada na Seção 2.4.

2.3.2 Modelos de Mobilidade Celular

Nesta seção o termo “celular” será utilizado para designar um dos tipos de categorização mais utilizados por pesquisadores da área, a macromobilidade. Esta categorização agrupa vários modelos que se caracterizam por tentar estudar os diversos comportamentos que se podem observar de usuários em um ambiente celular. Segundo Iyer (2001), em geral, os modelos de mobilidade devem incluir mudanças na direção e velocidade do móvel, dado que os usuários de aparelhos celulares necessitam se mover dentro de sua área de registro, ou até mesmo para fora dela. Alguns dos comportamentos que podem ser estudados em um ambiente celular são: o tempo médio de residência em uma célula, a probabilidade de mudança de uma célula para outra, a velocidade média que o usuário utiliza para se deslocar, a direção que o usuário segue, entre outros.

A estatística é uma ferramenta importante em modelos de mobilidade, uma vez que viabiliza a estimação de aspectos como média de permanência de um móvel em uma célula, funções adequadas para mudança de velocidade e direção, entre outros. A teoria do processo markoviano é um importante instrumento estatístico bastante utilizado por pesquisadores da área (Bar-Noy et al. 1995, Lam et al. 1996, Lam et al. 1997), para tentar representar a mobilidade de um usuário. Este processo se caracteriza por um conjunto de estados possíveis

e pela distribuição da probabilidade de transição entre cada estado (Rocha 2001).

Quando se deseja modelar uma rede de comunicação móvel sem fio como um processo markoviano, onde o número total de células é N , observa-se uma cadeia markoviana com N estados possíveis e cada estado é representado pelo fato do usuário estar situado em uma célula i , $i = 1, 2, \dots, N$. Com isso, X_t representa a célula na qual o usuário se encontra e t o tempo de residência ou permanência do usuário nesta célula. Observa-se, então, que se trata de um modelo que estuda a mobilidade como um processo contínuo com espaço de estados discreto. A Figura 12 apresenta um ambiente celular, onde a probabilidade de transição é $1/7$, em outras palavras, a probabilidade do usuário mudar para a célula i dado que ele se encontrava na célula j é $1/7$.

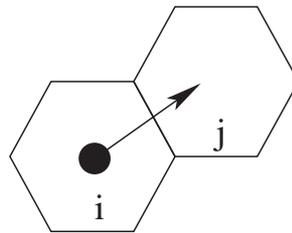


Figura 12: Diagrama dos estados de processo e suas respectivas probabilidades de transição.

A probabilidade do móvel mudar de célula depende apenas da posição que ele se encontra atualmente e não do passado. Observa-se, então, que o processo não possui memória, pois $X_{t_1}, X_{t_2}, \dots, X_{t_{n-1}}$ não importam para o cálculo da probabilidade de $X_{t_{n+1}} | X_{t_n}, X_{t_{n-1}}, \dots$.

Os modelos que utilizam expressões determinísticas ou expressões oriundas de um processo estocástico são usados para estudos de simulações, pois a estas expressões são associadas informações de diversas situações. Considerando os vários conceitos sobre caracterização vistos, vê-se que o modelo markoviano é um exemplo de modelo para estudos em simulações, pois o mesmo fornece uma estrutura que é facilmente adaptável aos modelos de mobilidade. Como o modelo markoviano é muito visto pelos pesquisadores como um modelo macroscópico, observa-se que ele não fornece a posição exata do usuário, pois na maioria das vezes este modelo não retrata um ambiente de rua, onde a localização do usuário é facilmente observada. Também pode-se verificar que o modelo utiliza duas dimensões para a movimentação do mesmo.

Vários pesquisadores sugerem trabalhar com a probabilidade de *handoff*, com o tempo de

residência dos móveis nas células ou com o número de usuários que atravessam a borda de uma célula de dentro para fora (Alencar 1999) ao invés de trabalhar com as trajetórias individuais dos móveis, que geralmente não têm importância em um ambiente celular. Em Chandra, Bansal, Shorey, Kulshreshtha Gupta (1999) foram estudados vários padrões de mobilidade e seus efeitos na probabilidade de *handoffs*. Estes autores estudaram várias mudanças de direções e descobriram um comportamento interessante: a probabilidade de *handoff* decresce quando o número de curvas efetuadas pelo móvel cresce.

Segundo Zonoozi Dassanayake (1997a) e Zonoozi Dassanayake (1997b), é permitido ao móvel mudar de direção até um certo ponto dentro da célula, ou seja, até um $\pm\Delta\varphi_{\max}$ (φ representa direção), e o tempo de residência pode ser descrito pela generalização da família gama de variáveis aleatórias.

O modelo de mobilidade desenvolvido por Hong Rappaport (1986) estuda o tempo de residência de móveis na célula para um caso simplificado de mobilidade. Este caso consiste em cada móvel escolher uma direção φ , onde a direção possui uma distribuição uniforme $[0, 2\pi)$ e a velocidade v está distribuída uniformemente em um intervalo $[0, v_{\max})$. Uma vez que estes valores são escolhidos, eles permanecem constantes até o usuário chegar ao limite da célula.

Re, Fantacci Giambene (1995) definem outra distribuição para a escolha da direção e velocidade e supõem que a distância percorrida por um móvel logo após cruzar o limite de uma célula é uniformemente distribuída em $[0, 2R)$, onde R é o lado de uma célula hexagonal.

Assim como alguns dos modelos citados na Seção 2.2, o modelo de mobilidade celular não reflete a realidade quando o cenário de simulação é representado por ambientes fechados, pois o comportamento estudado pelo modelo de mobilidade celular utiliza uma escala em quilômetros, ou seja, a macromobilidade.

2.3.3 Modelos de Mobilidade em Grupo

Nas seções anteriores foram consideradas apenas diversos móveis com comportamentos completamente independentes um dos outros. Entretanto, existem diversas situações onde é necessário modelar o comportamento dos móveis em conjunto, como, por exemplo, na situação onde um grupo de militares é designado para realizar uma tarefa em comum, como destruir minas, capturar elementos ou simplesmente trabalhar em conjunto. Nesta seção

serão apresentados alguns destes tipos de modelos de mobilidade.

Um dos primeiros exemplos de mobilidade em grupo foi o modelo proposto por Bergamo et al. (1996) o *Exponential Correlated Random Model*. Este modelo tenta reproduzir os movimentos possíveis tanto individual quanto grupal, através do ajuste dos parâmetros da função de movimento.

A atualização da posição é dada da seguinte forma: a nova posição $b_{t+1} \in \mathbb{R}^2$ é uma função da posição prévia b , para qual um desvio aleatório r é adicionado, isto é,

$$b_{t+1} = b_t e^{-\frac{1}{r}} + \left(\sigma \sqrt{1 - (e^{-\frac{1}{r}})^2} \right) r$$

onde $b_t = (r_t, \theta_t)$ é definido pelo grupo, ou seja, pelo móvel central de cada grupo, para um dado tempo t , e r é uma variável aleatória normal com variância σ^2 . Este último parâmetro permite ajustar a razão de mudança da antiga posição para a nova, pois valores pequenos de r causam grandes mudanças. Os parâmetros r e σ variam de grupo para grupo. Eles definem os grupos em diferentes movimentos padrões. Este modelo requer um conjunto completo de (r, σ) para que possa ser definido o movimento completo de uma rede.

No modelo proposto por Hong et al. (1999), chamado *reference point group mobility*, cada grupo possui um centro lógico. Os movimentos dos centros lógicos definem o comportamento não apenas do movimento dos móveis em seus grupos, como também da localização, velocidade, aceleração, direção e outros comportamentos. Geralmente os móveis são distribuídos uniformemente dentro do escopo geográfico de cada grupo. A cada passo de um móvel, o mesmo é alocado aleatoriamente dentre os seus vizinhos. O esquema do ponto de referência permite que o comportamento do movimento de cada móvel seja independente.

Em Sanchez (1998), é definido mais um modelo de mobilidade em grupo. O *Pursue Mobility Model*, como mencionado na Seção 2.2, tenta representar a mobilidade de móveis como uma estratégia de perseguição. Em outras palavras, este modelo objetiva estudar o comportamento do movimento de um grupo de móveis com um mesmo alvo. O modelo de busca, como também é referenciado, utiliza uma simples equação de atualização para a nova posição de cada móvel,

$$x_{i+1} = x_i + a(\text{alvo} - x_i) + v,$$

onde x_i representa a posição antiga do móvel, x_{i+1} a próxima posição, $a(\text{alvo} - x_i)$ é uma função que a partir da posição antiga e da direção alvo a ser seguida é gerada a informação

de busca e por fim v representa um vetor de valores aleatórios para cada móvel. Este vetor de valores aleatórios pode ser gerado, por exemplo, através do *Random Walk Mobility Model*. Em resumo, o comportamento da mobilidade do móvel neste modelo segue, por exemplo, o descrito no *Random Walk Mobility Model*, entretanto seus movimentos são gerenciados por um único objetivo; Figura 8.

De acordo com o que foi visto, os modelos de mobilidade em grupo trabalham o comportamento de grupos de móveis, portanto não se adequam ao comportamento a ser modelado neste trabalho, que lida com móveis individualmente.

2.4 O Modelo de Bettstetter

O modelo de mobilidade aleatório descrito na Seção 2.3.1 foi estendido por Bettstetter (2001). Esse novo modelo proposto foi classificado como sendo um modelo para movimento de usuários em duas dimensões e utiliza uma escala microscópica. O movimento dos usuários não é limitado por uma estrutura física, como por exemplo ruas, edifícios, etc., o que possibilita ao usuário a movimentação para qualquer lugar no plano de simulação. Um acréscimo de novas características ao modelo o torna mais realista e expressivo. Não há correlação entre os usuários, isto é, efeitos como movimento em grupo não são modelados. Dois processos estocásticos foram usados para modelar o movimento do usuário. Um deles determina para qual tempo o mesmo muda sua velocidade, ou seja, determina o tempo de aceleração ou desaceleração da velocidade do usuário, e o outro determina quando a direção poderá ser mudada.

Em Hong et al. (1999) é realizada uma crítica aos modelos propostos em Zonoozi Dassanayake (1997b) e em Sanchez (1998). De acordo com estes modelos, o comportamento do movimento do usuário pode ser gerado de forma não realista, isto é, com paradas inesperadas, ou até mesmo com mudanças repentinas de direção. Para tanto, o modelo proposto por Bettstetter (2001) apresenta uma correlação entre a direção e a velocidade, ou seja, a mudança de velocidade é incrementada pela aceleração atual do usuário e então a mudança de direção é suavizada. Portanto, uma vez definida a posição, a direção é, em geral, alterada em vários espaços de tempo até que a direção desejada seja alcançada e com isto cria-se uma curva suave. O tempo t , em segundos (s), utilizado pelo modelo proposto pode ser contínuo ou discreto. No caso do tempo de simulação ser discreto, este é quantificado em espaços de

tempo equidistantes.

De acordo com Bettstetter (2001), quando se deseja modelar o comportamento da velocidade do usuário a análise deve ser baseada no uso da velocidade alvo e aceleração linear, em outras palavras, um usuário anda com velocidade v acelerando ou desacelerando-a até que a velocidade alvo v^* seja atingida ou então, uma nova velocidade alvo seja escolhida.

O comportamento da velocidade pode então ser descrito por três variáveis: $v(t)$ em m/s sendo a velocidade corrente, a aceleração corrente $a(t)$ em m/s^2 , ou a velocidade alvo corrente $v^*(t)$ também em m/s ; entretanto, a unidade tempo é arbitrária. Além dessas variáveis, foram definidos também alguns parâmetros estáticos, como a velocidade máxima v_{\max} , um conjunto de velocidades preferenciais $v_{\text{pref}0}, v_{\text{pref}1}, \dots, v_{\text{pref}n}$ e um valor máximo para a desaceleração ou aceleração.

A velocidade máxima, v_{\max} , reflete a possibilidade de máxima velocidade que é permitida a um usuário dentro de um cenário; por exemplo, no centro da cidade pode-se supor que a velocidade máxima permitida a um usuário seja de $50 m/s$. Porém, em algum tempo t os usuários terão velocidade entre $0 \leq v(t) \leq v_{\max}$. Entretanto, como um usuário não se move aleatoriamente com velocidade distribuída uniformemente em $[0, v_{\max}]$, lança-se mão de um conjunto de velocidades preferenciais. O que prova a validade do uso das velocidades preferenciais é o fato de que um carro, com velocidade distribuída uniformemente em $[0, v_{\max}]$, não poderá atingir qualquer velocidade de acordo com esta distribuição, pois no cenário ao qual o veículo está inserido poderão existir vários cruzamentos fazendo com que o mesmo pare freqüentemente. Já a aceleração reflete a capacidade física de aumento ou redução da velocidade do usuário.

Em se tratando de uma simulação, o procedimento é o seguinte: de início, todos os usuários são criados, cada um em uma posição (x_t, y_t) em relação ao plano de simulação e com velocidade inicial $v(t)$, a qual é escolhida a partir da distribuição de probabilidade dada por

$$p(v) = \begin{cases} p(v=0)\delta(v), & v=0, \\ p(v=\frac{3v_{\max}}{5})\delta(v-\frac{3v_{\max}}{5}), & v=\frac{3v_{\max}}{5}, \\ p(v=v_{\max})\delta(v-v_{\max}), & v=v_{\max}, \\ \frac{1-p(v_{\text{pref}})}{v_{\max}}, & 0 < v < v_{\max}, \\ 0, & \text{c. c.}, \end{cases} \quad (2.1)$$

onde $p(v_{\text{pref}}) = p(v_{\text{pref0}}) + p(v_{\text{pref1}}) + p(v_{\text{pref2}}) < 1$, $v_{\text{pref0}} = 0$, $v_{\text{pref1}} = \frac{3v_{\text{max}}}{5}$, $v_{\text{pref2}} = v_{\text{max}}$ e $\delta(v)$ é a variação da velocidade, ou seja, velocidade atual subtraída da velocidade anterior. A velocidade do usuário permanece constante até que uma nova velocidade alvo seja escolhida, também a partir da expressão (2.1).

A evolução da velocidade no decorrer do tempo se dá através do processo de Poisson. O processo se desenvolve da seguinte forma: é observado o número de eventos de mudança da velocidade alvo usando um intervalo de tempo t . A escolha do tempo entre dois eventos de mudança de velocidade é realizada a partir de uma distribuição exponencial com parâmetro $\lambda = \frac{p_{v^*}}{\Delta t}$, onde p_{v^*} é a probabilidade de ocorrer mudança de velocidade a cada espaço de tempo, isto é,

$$p(t) = \frac{p_{v^*}}{\Delta t} e^{-\frac{p_{v^*} t}{\Delta t}}.$$

Como se trata de uma distribuição exponencial, pode-se obter o tempo médio entre dois eventos $\mu_{v^*} = \frac{\Delta t}{p_{v^*}}$; logo, supondo que o tempo entre dois espaços de tempo é $\Delta t = 1$, tem-se $\mu_{v^*} = \frac{1}{p_{v^*}}$.

Sendo t^* o tempo em que ocorre o evento de mudança de velocidade e fazendo $v^* = v^*(t^*)$, então se $v^*(t^*) > v(t^*)$, isto é, caso a velocidade corrente for menor que a velocidade alvo corrente, a escolha da aceleração a é efetuada a partir da expressão (2.2), caso contrário, se $v^*(t^*) < v(t^*)$, a escolha da aceleração a é efetuada a partir da expressão (2.3):

$$p(a) = \begin{cases} \frac{1}{a_{\text{max}}}, & 0 < a \leq a_{\text{max}}, \\ 0, & \text{c. c.}, \end{cases} \quad (2.2)$$

$$p(a) = \begin{cases} \frac{1}{a_{\text{min}}}, & 0 < a \leq a_{\text{min}}, \\ 0, & \text{c. c.}, \end{cases} \quad (2.3)$$

onde a a_{max} e a_{min} representam as capacidades máxima de aceleração e desaceleração do móvel, respectivamente.

A mudança da velocidade corrente até ocorrer um novo evento de mudança da velocidade alvo corrente é calculada a partir de (2.4), essa mudança sendo efetuada de forma determinística:

$$v(t) = v(t - \Delta t) + a(t)\Delta t. \quad (2.4)$$

A Figura 13 ilustra três casos que podem ocorrer em um intervalo de tempo qualquer.

Existem três retas distintas, a primeira reta retrata a situação onde o móvel alcançou a velocidade alvo v^* antes do tempo de alcance se encerrar; a seguinte (reta sólida) apresenta uma situação não muito comum na prática: o móvel conseguiu alcançar dentro do intervalo pré-estabelecido; a última reta mostra o caso em que o móvel não conseguiu alcançar a velocidade alvo.

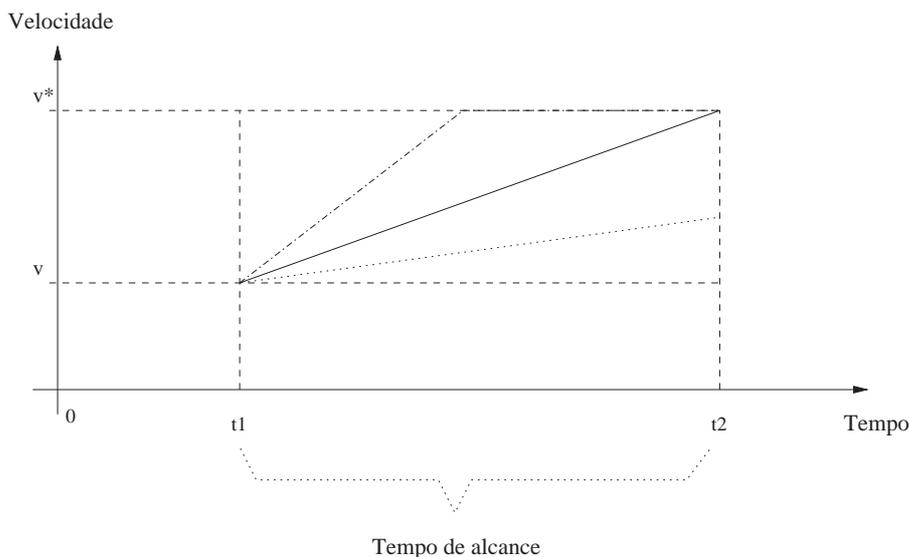


Figura 13: Representação gráfica do processo de controle de velocidade.

Quando se deseja modelar o comportamento da direção tomada pelo usuário, utiliza-se um processo estocástico semelhante ao efetuado para o comportamento da velocidade. A cada usuário é designada uma direção inicial a partir de (2.5):

$$p(\varphi) = \frac{1}{2\pi}, 0 \leq \varphi < 2\pi. \quad (2.5)$$

A evolução da direção no decorrer do tempo se dá através do processo de Poisson. Ou seja, usando tempo t discreto, a escolha do tempo entre dois eventos de mudança de direção é realizada a partir de uma distribuição exponencial, onde o tempo médio de mudança entre duas direções é $\mu_{\varphi}^* = \frac{\Delta t}{p_{\varphi}^*}$; logo, semelhante à velocidade, supondo que o tempo entre dois espaços de tempo é $\Delta t = 1$, tem-se $\mu_{\varphi}^* = \frac{1}{p_{\varphi}^*}$. A escolha da direção alvo também é obtida a partir de (2.5). A diferença de direção entre a escolha da nova direção no tempo t^* , $\varphi^*(t^*)$, e a direção anterior, $\varphi(t^*)$, é $|\Delta\varphi(t^*)| = |\varphi^*(t^*) - \varphi(t^*)|$, onde t^* é o intervalo de tempo em que ocorre um evento de mudança de direção e $\Delta\varphi(t^*)$ é uniformemente distribuída em

A maneira como um móvel anda aleatoriamente em um plano de simulação é, então, dada da seguinte maneira: quando o móvel penetra o plano de simulação, a velocidade e a direção inicial são escolhidas de acordo com suas distribuições definidas acima, bem como as velocidades e as direções alvo, as quais também seguem suas respectivas distribuições. Até que ocorra outro evento, onde sejam escolhidas novas velocidades e/ou direções alvo, o comportamento do movimento do móvel é determinístico, pois o cálculo da velocidade e direção correntes, como foi definido acima, é realizado a cada espaço de tempo.

Contudo, para que o móvel possa fazer uma curva em alta velocidade, sem que ele corra risco de realizar movimentos irreais e de acordo com o plano de simulação em que está inserido, é necessário haver uma correlação entre a velocidade e a direção. Para contornar os problemas de paradas bruscas e mudanças repentinas de direção, outro acréscimo proposto por Bettstetter (2001) ao modelo de mobilidade aleatório assume que a escolha da direção alvo φ^* não segue distribuição uniforme como descrito na equação (2.5). Entretanto, essa correlação não traz um efeito muito interessante para este trabalho.

No próximo capítulo será dada ao modelo desenvolvido por Bettstetter (2001) uma nova roupagem, ou seja, será levado em conta que o ambiente simulado é fechado e que o comportamento dos móveis possua características diferentes.

3 Modelo de Micromobilidade em Ambientes Confinados

Neste capítulo serão expostas inovações a serem acrescentadas a um determinado modelo de mobilidade de usuários para redes de comunicação sem fio em uma região delimitada. As inovações fazem com que o modelo possa representar melhor a mobilidade de usuários em uma região pré-determinada.

Tentar prever o comportamento humano quanto à sua mobilidade é um problema complexo, tornando, então, difícil a modelagem da movimentação de usuários de uma rede de comunicação móvel sem fio. Existem diversos fatores que influenciam a mobilidade, tais como a geografia da região, a época do ano, a hora do dia, entre outros. Entretanto, o modelo aqui proposto levará em conta apenas a geografia da região em estudo.

Diversos modelos de mobilidade utilizam diferentes mecanismos de controle de direção e de velocidade. Estes mecanismos tentam fazer com que a modelagem computacional do comportamento humano se aproxime do comportamento real. O modelo proposto por Bettstetter (2001), descrito na Seção 2.4, oferece parâmetros de fácil manipulação. Estes parâmetros são utilizados para tentar dar à velocidade e à direção maior flexibilidade, expressividade e representatividade para que, com isso, ao se manipular estes parâmetros a distribuição da velocidade e a distribuição da direção do usuário imitem o comportamento da mobilidade o mais próximo possível da realidade.

A proposta deste novo modelo de mobilidade consiste em estudar o comportamento de usuários de uma rede de comunicação móvel sem fio em um ambiente confinado. O modelo de micromobilidade utilizado em ambientes confinados tenta imitar o comportamento humano utilizando uma escala de metros. Este novo modelo difere do modelo descrito na Seção 2.4 pois, além de retratar um ambiente de simulação diferente, o modelo proposto por este tra-

balho acrescenta ao processo estocástico de mobilidade um processo estocástico de contágio. O modelo proposto por Bettstetter (2001) dá uma noção de mobilidade em um ambiente aberto, isto é, uma região urbana, mesmo assim, este modelo será tomado como base para a construção do processo de mobilidade desta dissertação.

Os ambientes confinados ou fechados são constituídos de bordas delimitando a área para a mobilidade do usuário. Com isso, há a necessidade de fazer com que o usuário não ultrapasse e não se prenda a essas bordas, sejam bordas de um obstáculo qualquer ou bordas que delimitem o cenário em estudo. Para tentar contornar este problema, utilizou-se uma regra de borda eficiente proposta em Almeida (2002).

Na Figura 15, o modelo utilizado para simular o comportamento da mobilidade de um usuário é o proposto por Bettstetter (2001); pode-se observar que quando o usuário se aproxima das bordas ele tem uma tendência de permanecer junto a elas. Esta figura, de dimensão 200×200 metros, é composta por: uma região por onde o usuário entra no ambiente de simulação (campo de entrada), localizada próximo à borda lateral esquerda; uma região por onde o mesmo possa sair (campo de saída), também posicionada próximo à borda lateral esquerda; uma região que corresponde à área de abrangência de uma antena (campo de infecção), localizada na borda lateral direita; e um obstáculo situado no centro do ambiente.

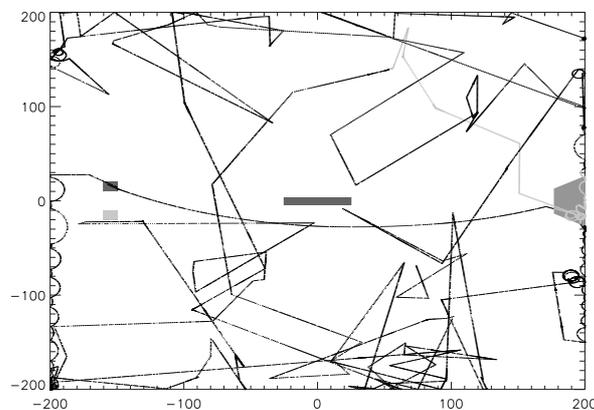


Figura 15: Mobilidade de um usuário usando apenas o modelo proposto por Bettstetter (2001).

A Figura 16, semelhantemente à Figura 15, apresenta a trajetória de um usuário de acordo com os aspectos de mobilidade propostos por Bettstetter (2001), entretanto, a regra de borda utilizada é a proposta por Almeida (2002).

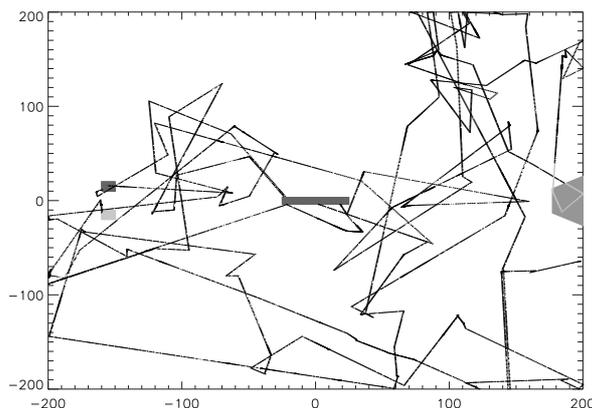


Figura 16: Mobilidade de um usuário usando a regra de borda.

O mecanismo utilizado por Almeida (2002) é observado na Figura 17; este mecanismo tem o propósito de aprimorar a mobilidade do usuário nas bordas da região simulada. O mecanismo de bordas consiste em fazer a escolha do novo ângulo obedecer a uma regra que permita que seja escolhida uma direção que coloque o usuário para dentro do campo de simulação e que seja mudada sua direção alvo. Em outras palavras, a expressão (3.1) indica que à direção anterior é acrescido um valor e logo após é escolhida uma nova direção alvo:

$$\varphi_i = \varphi_{i+1} + x, \quad (3.1)$$

onde φ é a direção anterior, x é o valor a ser acrescido e i é a variação no tempo.

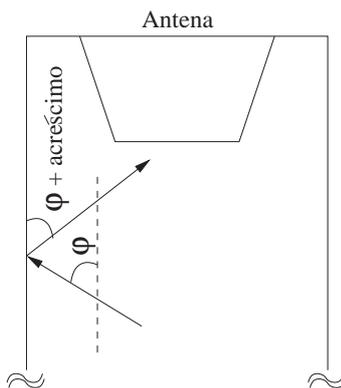


Figura 17: Mecanismo de regra de borda proposto por Almeida (2002).

Uma questão que se propõe ser melhorada é como fazer com que os usuários apareçam de forma aleatória ou desapareçam à medida que tocam o campo de saída. Existe também a regra

de borda no modelo apresentado na Seção 2.4, que não possui um bom desempenho. Esses acréscimos trazem ao modelo situações mais reais para um ambiente previamente delimitado.

O modelo proposto neste capítulo, além destes enriquecimentos, possui um mecanismo de transmissão de informações para usuários de sistemas sem fio com dois processos estocásticos acoplados: o processo de mobilidade e o processo de contágio. O processo de mobilidade, descrito na próxima seção, divide-se em dois outros processos estocásticos: o processo de controle de velocidade e o de controle de direção.

Enfim, de acordo com a Figura 18, o modelo proposto por este trabalho consiste no modelo de mobilidade de Bettstetter (2001), mais a regra de bordas de Almeida (2002) e acrescentando o modelo de contágio.

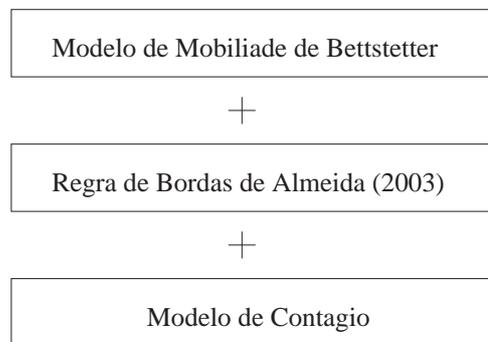


Figura 18: Esquema do modelo proposto por este trabalho.

3.1 Processo de Controle de Velocidade

Assim como no modelo apresentado na Seção 2.4, o comportamento da velocidade pode ser descrito por três variáveis dinâmicas: $v(t)$ sendo a velocidade corrente, a aceleração corrente $a(t)$ ou a velocidade alvo corrente $v^*(t)$. Além dessas variáveis, são definidos alguns parâmetros estáticos, como a velocidade máxima v_{\max} , um conjunto de velocidades preferenciais $v_{\text{pref}0}, v_{\text{pref}1}, \dots, v_{\text{pref}n}$ e um valor máximo para a desaceleração ou aceleração do usuário.

Em se tratando de um ambiente confinado, verifica-se a existência de um conjunto de velocidades preferenciais, que representa as velocidades habituais dos usuários. Temos que $v_{\text{pref}0} = 0$ reflete a possibilidade que o usuário tem de estar parado. Ainda $v_{\text{pref}n} = v_{\max}$ proporciona ao usuário a máxima velocidade que pode ser assumida. As velocidades pre-

ferenciais intermediárias dão flexibilidade ao usuário. Entretanto, em algum intervalo de tempo t os usuários podem assumir velocidades entre $0 \leq v(t) \leq v_{\max}$, que não sejam as preferenciais, para poder tentar se aproximar cada vez mais da realidade.

Iniciando o processo, escolhe-se a velocidade inicial $v = v(t)$ a partir da distribuição de probabilidade fornecida na Seção 2.4; esta expressão associa a cada velocidade existente uma probabilidade. Neste mesmo instante, é sorteada outra velocidade, esta devendo ser, se possível, alcançada pelo móvel. Para tanto, é também sorteado o intervalo de tempo que o móvel tem para alcançar ou não a velocidade. Este tempo de alcance é gerado a partir de uma exponencial com parâmetro λ_{ta} , este parâmetro representando o tempo médio de alcance.

Para que o móvel desenvolva a velocidade corrente, a mesma é comparada com a alvo a cada passo. Se $v^*(t^*) > v(t^*)$, isto é, caso a velocidade corrente for menor que a velocidade alvo corrente, é acrescido um determinado valor, a aceleração, para que o móvel possa alcançar a velocidade alvo. A escolha da aceleração a é efetuada a partir da expressão (2.2), onde é estipulado um valor para a máxima aceleração. Caso contrário, se $v^*(t^*) < v(t^*)$, então é subtraído um determinado valor, a aceleração, para que o móvel possa alcançar a velocidade alvo. A escolha desta aceleração a é obtida pela expressão (2.3), que descreve a distribuição da desaceleração mínima.

Esta aceleração ou desaceleração é acrescida à velocidade corrente a cada passo, até que ocorra um novo evento de mudança da velocidade alvo corrente. A expressão (2.4), descrita na Seção 2.4, representa este processo determinístico.

A Figura 19 fornece o gráfico da velocidade em função do tempo. Nela é observado que no instante $t_0 = 0$ é sorteado um intervalo de tempo t_1^* , para que o móvel com uma velocidade inicial v alcance a velocidade $v_1^* = v_1^*(t)$, ambas geradas aleatoriamente no mesmo instante $t_0 = 0$. Entretanto, o tempo de alcance t_1^* se encerra e a velocidade alvo $v_1^* = v_1^*(t)$ não é atingida.

Como foi observado na Figura 19, a velocidade v_1^* não foi alcançada; logo, ao término do tempo t_1^* , isto é, no instante t_1 , assim como no instante $t_0 = 0$, são gerados aleatoriamente a nova velocidade alvo v_2^* e um novo tempo de alcance t_2^* . Analisando agora a Figura 20, observa-se que no instante t_2 o usuário alcançou a velocidade alvo antes do intervalo de tempo t_2^* ter terminado, permanecendo constante até o fim do intervalo de tempo.

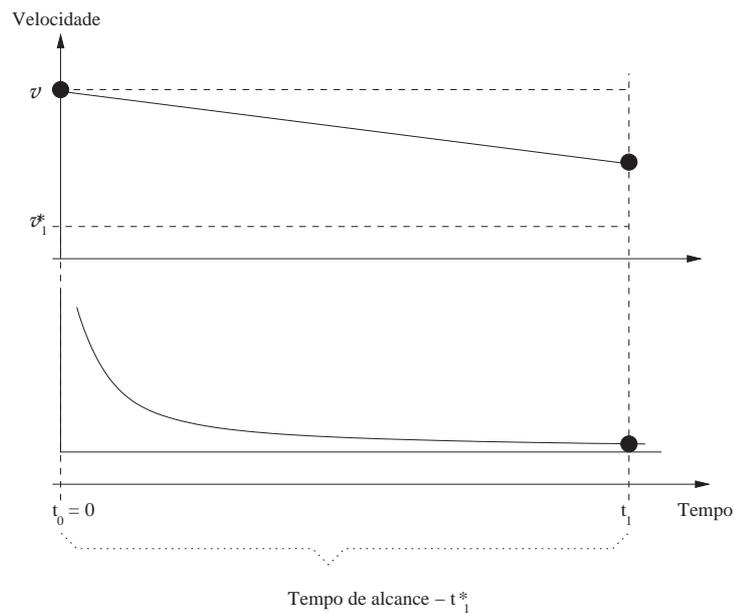


Figura 19: Representação gráfica do processo de controle de velocidade para t_1^* .

Examinando a Figura 21 verifica-se um caso não muito real: exatamente ao término do tempo t_3^* , ou seja no instante t_3 , o móvel alcança a velocidade alvo v_3^* . Na prática, as situações mais comuns são as representadas nas Figuras 19 e 20.

Em uma simulação realizada, com o tempo total de 300 segundos, foi observado o comportamento da velocidade de um móvel. O ambiente simulado possui as mesmas características descritas acima, ou seja, consiste de uma região de 200×200 metros com um campo de entrada, outro de saída, um obstáculo e uma região de infecção. A Figura 22 retrata esta simulação e apresenta um gráfico da velocidade, em m/s , contra o tempo total. No instante zero, o móvel é gerado e, conseqüentemente, sua velocidade inicial, velocidade alvo e tempo de alcance. Porém, no decorrer da simulação verifica-se que se passados 100 segundos, aproximadamente, o móvel se encontram parado, subentende-se que o móvel ainda não entrou no campo de simulação. Logo após, foram gerados a velocidade corrente, a velocidade alvo e o tempo de alcance. Observa-se na figura que a velocidade inicial corrente é $v = 3.5m/s$, aproximadamente, e que a velocidade alvo é $v_1^* = 0$. Entre estas duas velocidades o comportamento da velocidade do móvel é determinístico.

Sabe-se que evolução da velocidade no decorrer do tempo se dá através do processo de Poisson, pois neste processo é observado o número de eventos de mudança da velocidade alvo

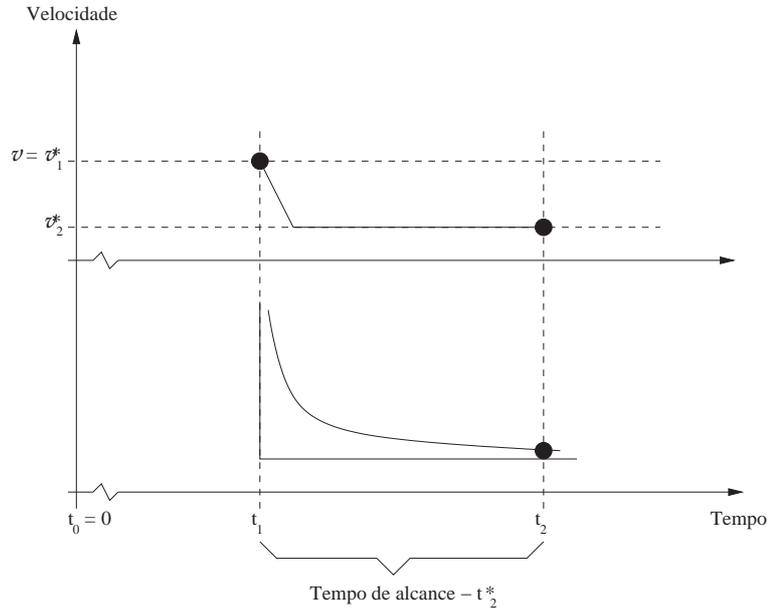


Figura 20: Representação gráfica do processo de controle de velocidade para t_2^* .

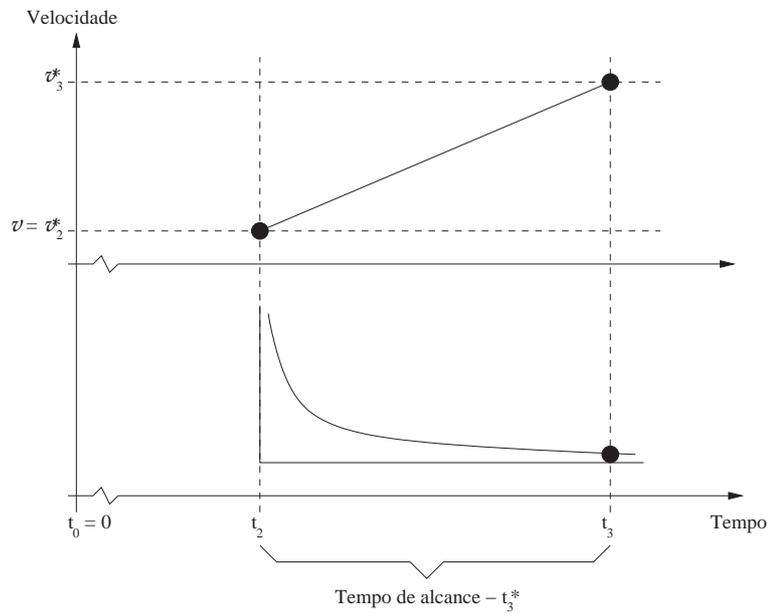


Figura 21: Representação gráfica do processo de controle de velocidade para t_3^* .

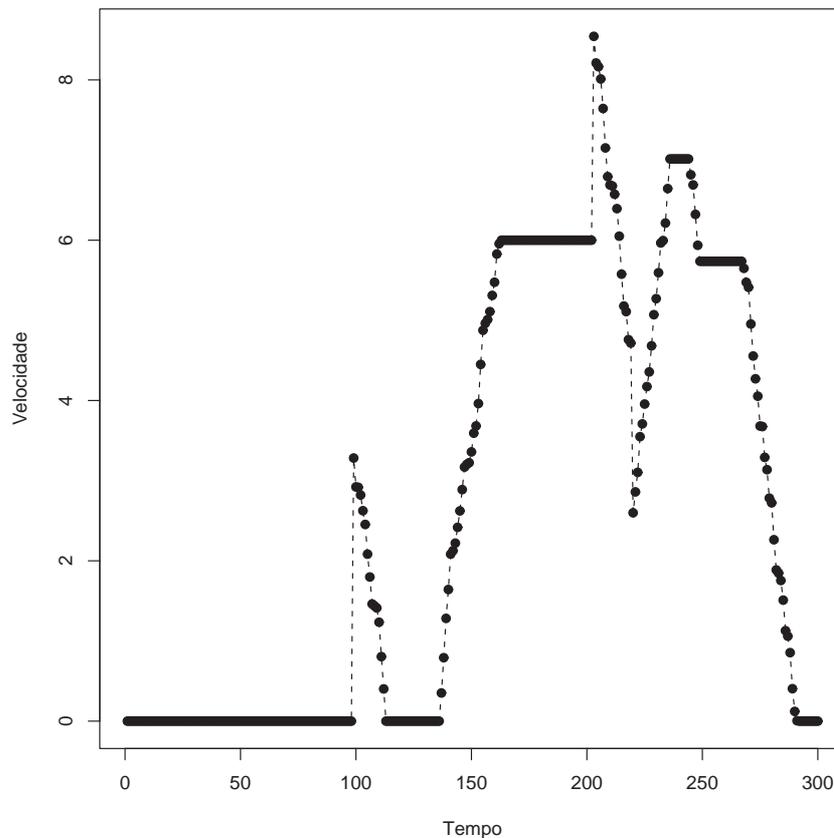


Figura 22: Representação gráfica do processo de controle de velocidade no tempo.

ocorridos em um intervalo de tempo t .

Como mencionado anteriormente, a escolha do tempo entre dois eventos de mudança de velocidade é realizada a partir de uma distribuição exponencial com parâmetro $\lambda = \frac{p_{v^*}}{\Delta t}$, onde p_{v^*} é a probabilidade de ocorrer mudança de velocidade a cada espaço de tempo. De acordo com a distribuição exponencial, o tempo médio entre dois eventos é verificado através da média, que para o caso deste processo é $\mu_{v^*} = \frac{\Delta t}{p_{v^*}}$, logo, supondo que o tempo entre dois espaços de tempo é $\Delta t = 1$, tem-se $\mu_{v^*} = \frac{1}{p_{v^*}}$.

Na seção seguinte será abordada a descrição do processo estocástico de controle de direção tomando como base o processo proposto por Bettstetter (2001) e utilizando a regra de borda de Almeida (2002).

3.2 Processo de Controle de Direção

O comportamento da direção tomada pelo usuário é determinado de forma semelhante ao efetuado para o comportamento da velocidade.

Sabendo que se trata de um ambiente confinado, observa-se a existência de barreiras impedindo a livre mobilidade do usuário pelo plano de simulação. A regra de borda proposta por Bettstetter (2001) não descreve bem a mobilidade de um usuário, pois quando este encontra um obstáculo ele tem dificuldade de se afastar, permanecendo junto ao obstáculo por quase toda a simulação. Entretanto, a regra de borda proposta por Almeida (2002) mostra que quando o usuário se depara com um obstáculo, é escolhido um novo ângulo de maneira que ele tenha uma maior probabilidade de se afastar do mesmo.

A direção inicial $\varphi(t)$ é, então, escolhida a partir da distribuição $U(0, 2\pi)$, vista na expressão (2.5) localizada na página 32. Existe, assim como no processo de controle de velocidade, o intervalo de tempo que o usuário tem para alcançar ou não a direção. Este intervalo de tempo t^* é gerado a partir de uma distribuição exponencial com parâmetro λ_{t^*} , que representa o tempo médio de alcance. No processo de controle de direção são, então, definidos os intervalos de tempo e as direções alvo corrente, que o móvel deverá ou não alcançar, dentro destes intervalos de tempo. O modelo proposto simula as posições iniciais dos usuários aleatoriamente no ponto de entrada do campo de simulação.

A mudança de direção entre a direção corrente e a alvo é realizada da seguinte maneira: a direção corrente é comparada com a alvo corrente a cada passo, ou espaço de tempo. Esta mudança de direção também é efetuada de forma determinística de acordo com a expressão (2.6). Esta expressão revela que a cada passo é acrescentado um valor aleatório à direção corrente. Caso o móvel tenha chegado à direção alvo antes que o tempo determinado para essa mudança tenha finalizado, o mesmo continua na mesma direção até ser escolhida uma nova direção alvo.

Na Figura 23 observa-se que no instante $t_0 = 0$ são gerados aleatoriamente a direção inicial φ , a direção alvo φ_1^* e o tempo de alcance t_1^* . Para que o usuário alcance a nova direção, ou direção alvo corrente $\varphi_1^* = \varphi_1^*(t^*)$, é necessário haver um incremento a sua direção corrente. Verifica-se que com o incremento a direção pôde ser alcançada antes do tempo t_1^* se encerrasse.

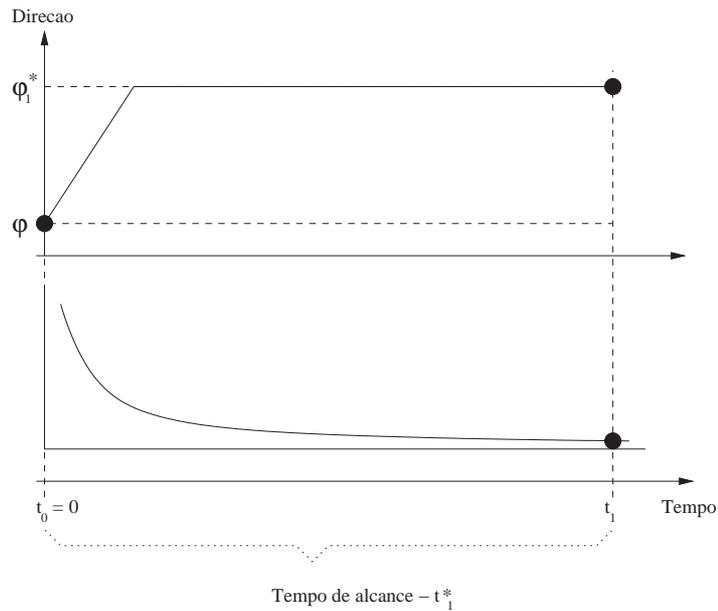


Figura 23: Representação gráfica do processo de controle de direcao para t_1^* .

Em contrapartida, a Figura 24 mostra que o móvel atualizou sua direção para $\varphi = \varphi_1^*$ e que a direção alvo φ_2^* foi alcançada exatamente durante t_2^* . Esta é uma situação não muito real, pois para ocorrer é necessário que o incremento seja preciso.

Além da situação apresentada na Figura 23, uma outra muito comum na prática é exibida na Figura 25. Nesta última, a partir da direção $\varphi = \varphi_2^*$ com, possivelmente, um incremento impreciso ou um tempo de alcance curto não se pode saber ao certo, se o móvel conseguiu alcançar a direção desejada.

Com a Figura 26, pode-se analisar o comportamento da direção, utilizando a simulação realizada anteriormente. Passados 100 segundos, aproximadamente, assim como observado na Figura 22, o móvel se encontra parado, subentendendo-se que o móvel não entrou no campo de simulação. Portanto, a direção inicial φ , a direção alvo $\varphi^* = \varphi^*(t^*)$ e um novo tempo de alcance t^* são gerados apenas após, aproximadamente, 100 segundos. Observa-se na Figura 26 que a direção inicial corrente é $\varphi = 2,5m/s$, aproximadamente, e que a direção alvo é $\varphi_1^* = 0$. Entre estas duas direções o comportamento da mesma é determinístico.

Nestas duas seções foram descritos dois processos estocásticos, que juntos formam o processo estocástico de mobilidade. A seção seguinte consiste na descrição de um novo processo, o processo de contágio.

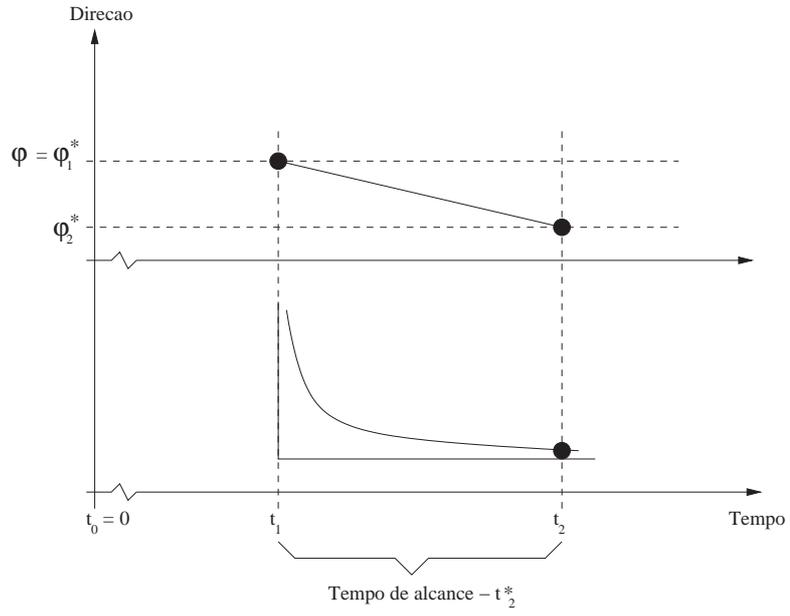


Figura 24: Representação gráfica do processo de controle de direcao para t_2^* .

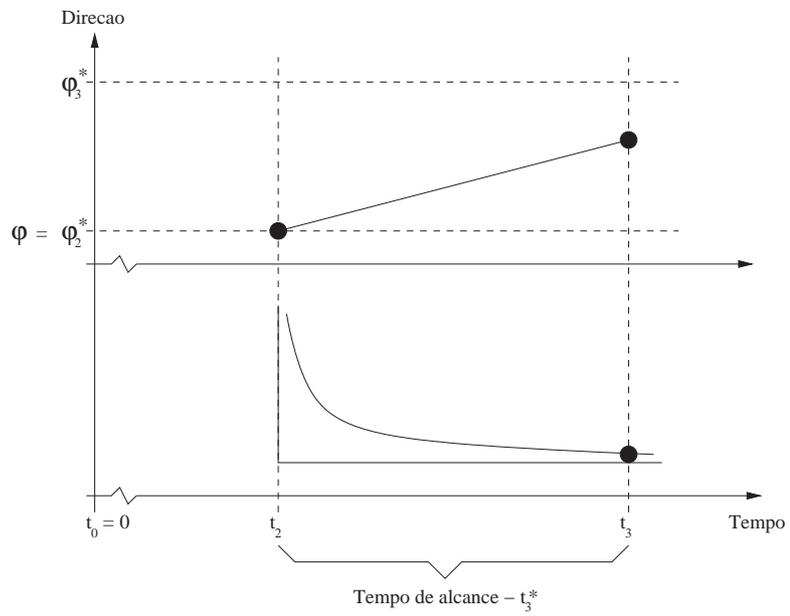


Figura 25: Representação gráfica do processo de controle de direcao para t_3^* .

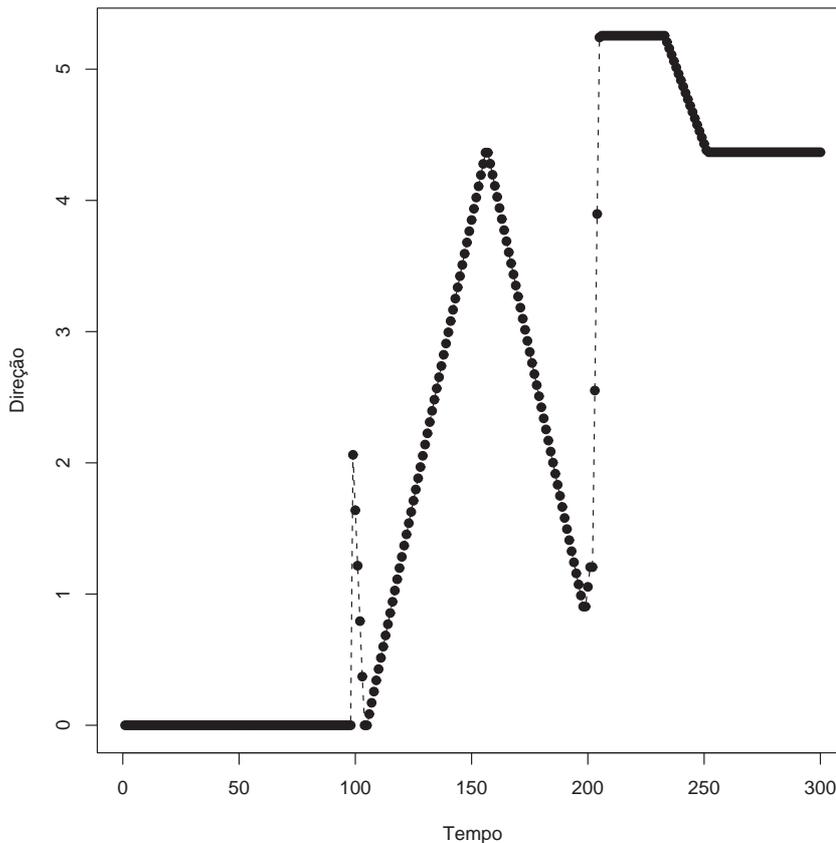


Figura 26: Representação gráfica do processo de controle de direção no tempo.

3.3 Processo de Contágio

Dentre as várias estratégias possíveis, dados o advento da comunicação móvel e sua penetração em todos os setores sociais, é possível e desejável empregar os telefones celulares como receptores e transmissores de anúncios publicitários.

Como mencionado anteriormente, o ambiente de simulação contém várias regiões, uma delas sendo a região de contaminação. Esta região, chamada de antena, consiste de ondas eletromagnéticas, para que toda e qualquer difusão de dados possa ser realizada. Esta antena pode ser fixa ou móvel; a antena móvel é gerada por cada usuário que receber os dados da antena fixa.

O processo de contágio pela antena, ou contágio primário, é realizado quando o usuário passa pela região da antena. Assim que o usuário sofre a contaminação primária é sorteado

um tempo t , independente dos tempos sorteados para os processos de controle de direção e velocidade, pois cada processo foi gerado independente do outro. Enquanto não se encerra o tempo de contágio, o usuário se torna em uma nova antena de transmissão.

A Figura 27 apresenta dois casos de possível ocorrência durante a simulação. No primeiro caso, existe apenas uma contaminação, ou seja, o usuário penetra a área de transmissão da antena e o tempo de permanência do usuário com a informação é suficientemente grande a ponto de que o mesmo saia da região contaminado. Entretanto, o que se vê no segundo caso é que o tempo de contaminação não é suficiente para que o usuário saia contaminado, sendo então gerado um novo tempo para que o mesmo possa sair contaminado.

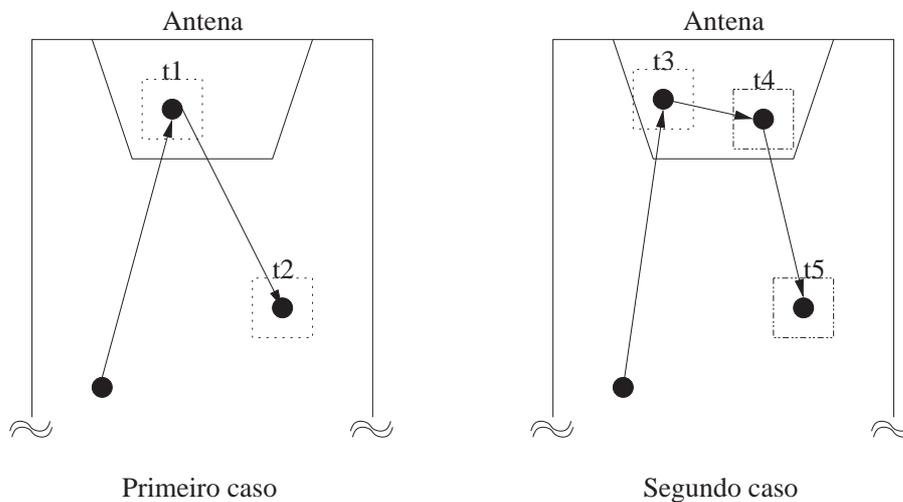


Figura 27: Representação gráfica do mecanismo de contágio primário.

Observa-se na Figura 28 que o tempo de contaminação decresce à medida que o tempo de simulação corre e que o número de contaminações sofridas por um único usuário é aleatório. Como se percebeu na Figura 27, podem haver duas situações diferentes, a primeira caso o usuário saia do campo de contágio assim que for contaminado e a segunda caso o mesmo permaneça mais tempo dentro do campo de contágio que o tempo de contágio. Estas situações também podem ser visualizadas na Figura 28; no tempo t_1 o usuário sofre uma contaminação primária e permanece assim até t_2 . O mesmo usuário no tempo t_3 sofre uma contaminação primária, permanece assim até t_4 , mas por não ter saído do campo de simulação recebe um novo tempo de contágio permanecendo contaminado até t_5 .

Quando o usuário sofre contaminação primária é criada em volta do mesmo uma região

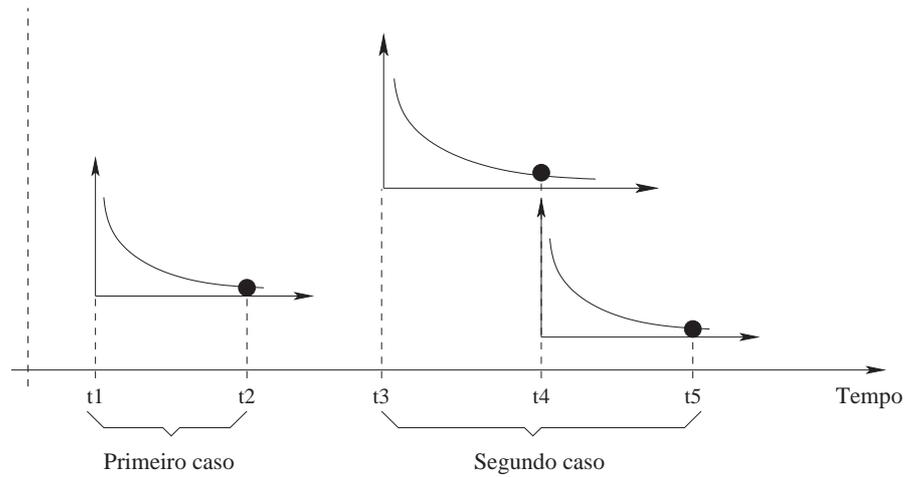


Figura 28: Representação gráfica do mecanismo de contágio primário no tempo.

quadrada com uma área de contaminação igual a ℓ^2 , onde ℓ é o lado do quadrado. Dessa forma, o usuário se transforma em mais uma antena, apenas com uma diferença: a antena agora é temporariamente móvel. O processo de contágio pela contaminação secundária, ou contaminação usuário a usuário, é realizado da mesma forma da contaminação primária.

A transmissão secundária pode ser observada na Figura 29. Verifica-se que como o campo de contágio gerado por um usuário tende a ser menor do que o da antena fixa, então a probabilidade do usuário ser infectado duas vezes por um mesmo usuário é quase inexistente.

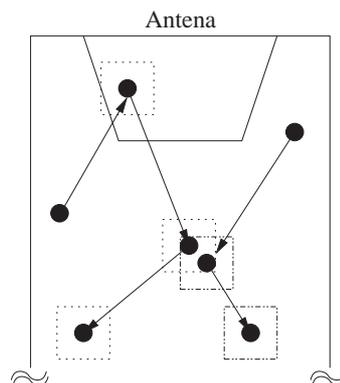


Figura 29: Representação gráfica do mecanismo de contágio secundário.

Neste capítulo foram descritos processos estocásticos responsáveis pela mobilidade dos usuários. Os processos de controle de velocidade e direção, propostos por Bettstetter (2001),

sofreram algumas modificações para que fosse possível modelar usuários de acordo com um ambiente fechado. O diferencial proposto por esta dissertação, no que diz respeito ao modelo trabalhado, encontra-se no processo de contágio. Este último consiste no mecanismo de proliferação da informação.

4 *Descrição do Ambiente e do Estudo*

Neste capítulo será caracterizado o problema da mobilidade a ser tratado como estudo de caso nesta dissertação, através da descrição do ambiente e do estudo, de acordo com os parâmetros de mobilidade descritos no Capítulo 3.

4.1 **Descrição do Estudo**

As pesquisas na área da comunicação móvel têm um grande potencial nos sistemas de comunicação sem fio (*wireless communication*), nos sistemas celulares, entre outros. Com o avanço principalmente da tecnologia que envolve a comunicação móvel foi possível observar e estudar diferentes modelos de mobilidade.

A opção inicial foi pela escolha de um modelo de mobilidade que se mostrasse fácil na administração do comportamento de locomoção individual dos usuários e que apresentasse uma arquitetura maleável para o ambiente de simulação.

Dentre uma grande variedade de modelos de mobilidade, juntamente com seus diversos mecanismos de administração do deslocamento de usuários, o modelo que mais se mostrou eficiente para com os procedimentos de controle do comportamento da mobilidade do usuário móvel foi o proposto por Bettstetter (2001). Este modelo se caracteriza por apresentar a mobilidade dos usuários em escala microscópica, ou seja, pode-se visualizar os usuários que se movem em ambientes abertos, como por exemplo ruas ou em ambientes fechados, como é o caso de um *shopping center*. Outra característica deste modelo é o fato de que a mobilidade dos usuários pode ser representada em um plano cartesiano (x, y) , ou seja, a movimentação dos usuários pode ser descrita em duas dimensões. Pode-se observar ainda que o modelo proposto por Bettstetter (2001) procurou caracterizar o movimento dos usuários através de

processos estocásticos. O modelo consiste de dois processos estocásticos acoplados, sendo estes o processo de mobilidade e o processo de contágio.

Complementando, foi realizado um estudo de caso referente à situação de se desejar fazer propaganda em um ambiente fechado, como o de um *shopping center*. A propaganda é o efeito de propagar ou projetar a imagem da empresa no mercado através dos meios de comunicação disponíveis na comunidade, como por exemplo, televisão, rádio, cinema, imprensa, revistas, *outdoors*, internet e outras mídias, veiculando mensagens sobre produtos ou serviços às diversas fatias de mercado. Nesta dissertação, as informações publicitárias ganharão mais um meio de propagação: os aparelhos celulares.

A transmissão do anúncio pode ser feita por antenas de baixa potência, acessíveis a donos de lojas. O alcance dessas antenas é proporcional ao seu custo mas, para atingir o maior número possível de usuários móveis sem encarecer exageradamente o processo de divulgação, é também possível fazer com que cada receptor se transforme, temporariamente, em um transmissor. Desta maneira, a disseminação da propaganda pode ser vista como um processo de contágio, onde a “doença” é a informação, há uma fonte de contágio (a antena instalada pela loja) e os usuários estão sujeitos a contágio primário (a partir da loja) e secundário (a partir de outros usuários “infectados”). A informação carregada por usuários “infectados” é volátil e é apagada após um certo tempo.

Em diversas áreas os processos de infecção e proliferação são pesquisados. Alguns físicos, como Kree, Schaub Schmittmann (1989), van Wijland, Oerding Hilhorst (1998) e van Wijland, Oerding, Leroy Hilhorst (2000), estudam problemas referentes a reação e dispersão. Kree et al. (1989) investigaram os efeitos da poluição em populações à beira da extinção. Eles observaram que o valor médio da densidade populacional tende a desaparecer exponencialmente na presença da poluição. Voltando ao contexto da dissertação, a taxa de usuários infectados tende a crescer quando a proliferação está crescendo.

van Wijland et al. (1998) descrevem de maneira sucinta a teoria encontrada na literatura sobre o processo de difusão-reação-decadência. Eles realizam um estudo sobre a propagação de uma determinada epidemia em uma determinada população, utilizando um conjunto de parâmetros que, devido à epidemia, estão perto de desaparecer. Por fim, eles adaptaram o esquema de renormalização de Wilson para o processo de reação-difusão.

4.2 Descrição do Ambiente

O ambiente utilizado para simular a circulação de pedestres portadores de aparelhos celulares escolhido foi uma galeria comercial. A opção por este tipo de ambiente tem o propósito de disponibilizar ao meio científico uma nova opção de estudo.

O *shopping center* que disponibilizou as informações necessárias para dar andamento ao processo de validação do modelo proposto foi o *Natal Shopping*, inaugurado em 4 de junho de 1992, sendo este o primeiro *shopping center* regional do Rio Grande do Norte. Totalizando 42000 metros quadrados de área construída, sendo 14500 metros quadrados de ABL (área bruta locável), o *Natal Shopping Center* é composto por uma loja de departamento, como âncora, e 138 lojas satélites e 1000 vagas no estacionamento. O número médio de pessoas que circulam neste centro comercial é de 20000 pessoas ao dia.

A Figura 30 ilustra a planta do piso inferior do centro comercial em estudo. Ela possui uma praça de eventos com $350m^2$ e uma praça de alimentação com aproximadamente a mesma área. O acesso a este piso se dá por duas escadas rolantes, dois elevadores, além de duas entradas que dão acesso ao estacionamento. A parte deste piso que está levemente quadriculada juntamente com a praça de eventos se refere ao espaço disponível à locomoção do pedestre, o que totaliza uma área de $27500m^2$. Levando em consideração que no piso inferior se concentra o maior número de pessoas foi que se escolheu reduzir o ambiente de estudo a este piso.

Tentando expressar praticamente todas as características do centro comercial sem perda de generalidade, reduziu-se o número de entradas que dão acesso ao piso inferior. O ambiente montado para o estudo possui apenas uma entrada, uma saída e um obstáculo. A entrada e a saída representam as escadas rolantes que dão acesso a este piso e o obstáculo representa a praça de alimentação. A dimensão do ambiente é $40000m^2$, possuindo, então, uma área de circulação maior que a do *shopping* simulado. As áreas de entrada e saída possuem $100m^2$ cada, representando individualmente 0,25% da área total de circulação. O obstáculo representa 1% da área total de circulação, ou seja possui uma área de $400m^2$.

Foram caracterizados dois ambientes de estudo para poder verificar qual a melhor localização da antena fixa. De acordo com a Figura 31, o primeiro ambiente de estudo consiste de uma região de entrada, uma região de saída, um obstáculo e na entrada foi acoplada uma antena de transmissão de anúncio.



Figura 30: Planta do piso inferior do Natal Shopping.

O segundo ambiente a ser estudado, como se pode observar a Figura 32, é composto de uma região de entrada, uma região de saída, um obstáculo e uma antena localizada no lado oposto a região de entrada.

Com estes dois cenários deseja-se mostrar que a localização da antena tem grande importância. Especula-se que a antena localizada na entrada, além de contemplar a todos os usuários com o anúncio, esta localização estratégica proporciona ao anúncio um maior deslocamento dentro do *shopping*.

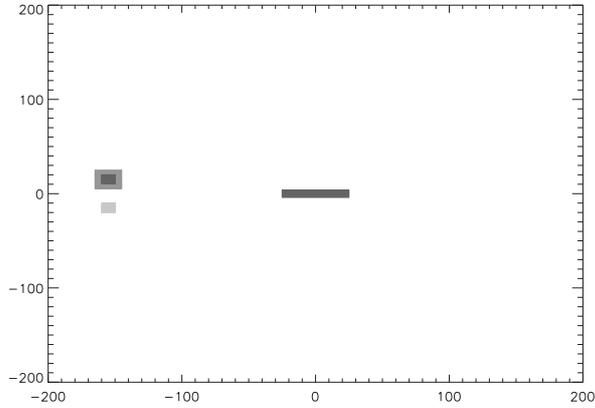


Figura 31: Primerio ambiente de estudo.

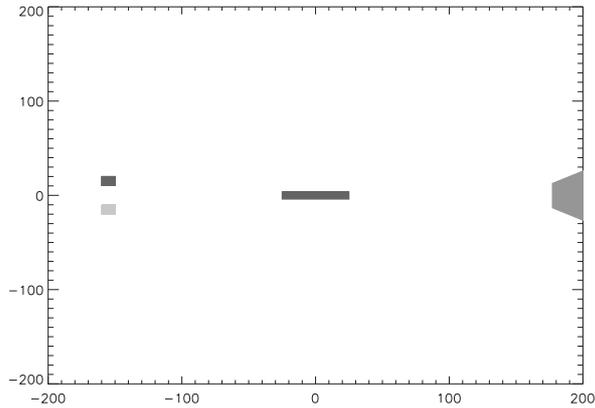


Figura 32: Segundo ambiente de estudo.

5 *Simulação e Resultados*

Após o estudo dos principais modelos existentes na literatura, foi escolhido um modelo que se adequasse ao movimento de usuários em ambientes confinados. O modelo envolve dois processos estocásticos acoplados, o processo de mobilidade e o de contágio. Para verificar a viabilidade dos processos, em particular do processo de contágio proposto, é que se tomou como ambiente de simulação o interior de um *shopping center*.

As informações que podem ser extraídas de uma simulação realizada envolvendo os dois processos estocásticos são, dentre outras possíveis,

- a taxa média de usuários infectados,
- a distância máxima que a informação percorre e
- a taxa média de usuários que saem infectados do campo de simulação.

A taxa média de usuários infectados pela informação, bem como a taxa média dos que saem infectados do campo de simulação é calculada através dos usuários infectados pela antena fixa bem como pela antena móvel (usuário a usuário). A Figura 33 apresenta o esquema do cálculo para a distância máxima que a informação percorre. Tomando como base a Figura 33 e observando o caminho do móvel, a distância é calculada comparando as distâncias percorridas até uma curva efetuada pelo mesmo. Ou seja, calculam-se as distâncias entre os pontos 1 e 2, 1 e 3 e 1 e 4, e verifica-se qual a maior distância percorrida. A distância máxima, além de ser calculada a partir do ponto em que o móvel sofre contaminação primária, é também calculada quando o móvel sofre contaminação secundária.

Foram realizadas diversas simulações para obter uma perspectiva de onde seria mais viável se localizar a antena fixa, embora seja intuitivo que o lugar mais adequado é o mais próximo ao ponto onde os usuários entram. O tempo simulado foi fixado em duas horas. Foram

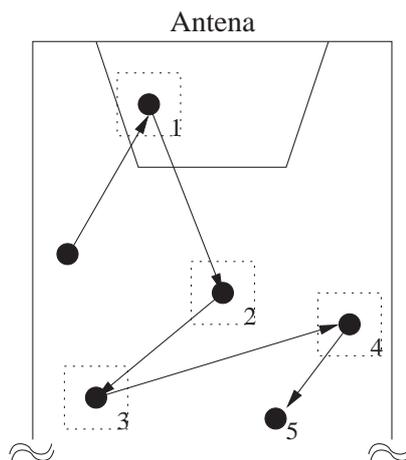


Figura 33: Representação gráfica do mecanismo de cálculo da distância máxima.

efetuadas 100 réplicas para cada um dos dois ambientes e em cada ambiente foram simulados cinco diferentes tamanhos de áreas para as antenas fixa e móvel. Cada réplica durou cerca de dez minutos na plataforma computacional empregada (descrita no Capítulo 1). Portanto, foram realizados um total de 10 experimentos, cada um com 100 replicações, o que equivale a cinco dias de simulação.

Entretando, até que os resultados para análise fossem alcançados, foram realizadas diversas outras simulações, totalizando um tempo de estudo de aproximadamente 30 dias. Essas simulações adicionais serviram para alcançar uma certa familiaridade com os parâmetros, bem como para atingir um comportamento estável que não fosse significativamente dependente das configurações iniciais. É conveniente frisar que os tempos de execução reportados foram alcançados sem que fosse feita a exibição das trajetórias, já que a saída gráfica faz com que as simulações consumam muito mais tempo.

No que segue serão comentados os resultados para duas situações:

Situação 1: a antena é localizada acoplada à entrada dos móveis,

Situação 2: a antena é localizada no extremo oposto à entrada dos móveis.

Para poder analisar as duas situações foram realizadas 10 simulações, sendo o número máximo de usuários dentro de cada ambiente igual a 50. Esse número representa o número aproximado de pessoas que circulam dentro do *shopping center* citado no capítulo anterior, no período de duas horas.

5.1 Situação 1

Realizaram-se para essa situação simulações onde foram especificados cinco diferentes tamanhos de áreas de abrangência para as antenas fixas; a geometria definida para as áreas foi a de um quadrado. Estes tamanhos (100, 250, 400, 650 e 900 metros quadrados) foram sugeridos após calcular o percentual de cada área de abrangência em relação ao tamanho total de área contruída do *shopping center*. Para a área de abrangência da antena móvel, os valores estipulados foram 1, 2, 4, 6 e 8 metros quadrados. Estes valores de áreas foram inspirados na capacidade de comunicação disponível em equipamentos dotados de conexão por infra-vermelho, protocolo *Bluetooth* etc., mas sem compromisso forte com as tecnologias atuais. A Figura 31 ilustra um dos cinco casos para esta situação.

A Figura 34 mostra o gráfico da média das distâncias máximas percorridas pela informação em função da área de abrangência da antena fixa, com o intervalo de confiança assintótico ao nível 95% observado nas 100 replicações. Para esta situação a antena está localizada acoplada à entrada dos móveis no cenário simulado.

Esta figura revela que, à medida que se aumenta a área da antena, a distância percorrida pela informação é maior, porém a taxa de crescimento decresce e, aparentemente, irá convergir até se estabilizar. Esta constatação quantitativa confirma a intuição de que maiores áreas de abrangência (e, portanto, maiores custos de instalação) irão redundar em maiores distâncias percorridas pela informação.

A Figura 34 mostra que há um crescimento de 3,63% na distância média percorrida até quando área coberta pela antena é de aproximadamente $400m^2$. Logo depois há um crescimento pouco expressivo. De fato, o ganho em aumentar a área de $400m^2$ para $900m^2$ definitivamente não é substancial, um vez que o crescimento da média da distância máxima percorrida neste intervalo de área é de 0,27%. Observa-se ainda que a imprecisão do intervalo de confiança é maior à medida que a área de cobertura aumenta.

Ao analisar a Figura 35, onde as distâncias calculadas para compor o gráfico foram obtidas a partir da contaminação secundária, com referência às simulações realizadas anteriormente, observa-se a evidência de um crescimento de 35,93% na distância média percorrida quando a área coberta pela antena móvel varia de $1m^2$ para $2m^2$. Em seguida, nota-se que a taxa de crescimento não é suficientemente grande ao ponto de sugerir uma área de abrangência móvel maior. Pode-se observar ainda que o intervalo de confiança torna-se mais amplo à medida

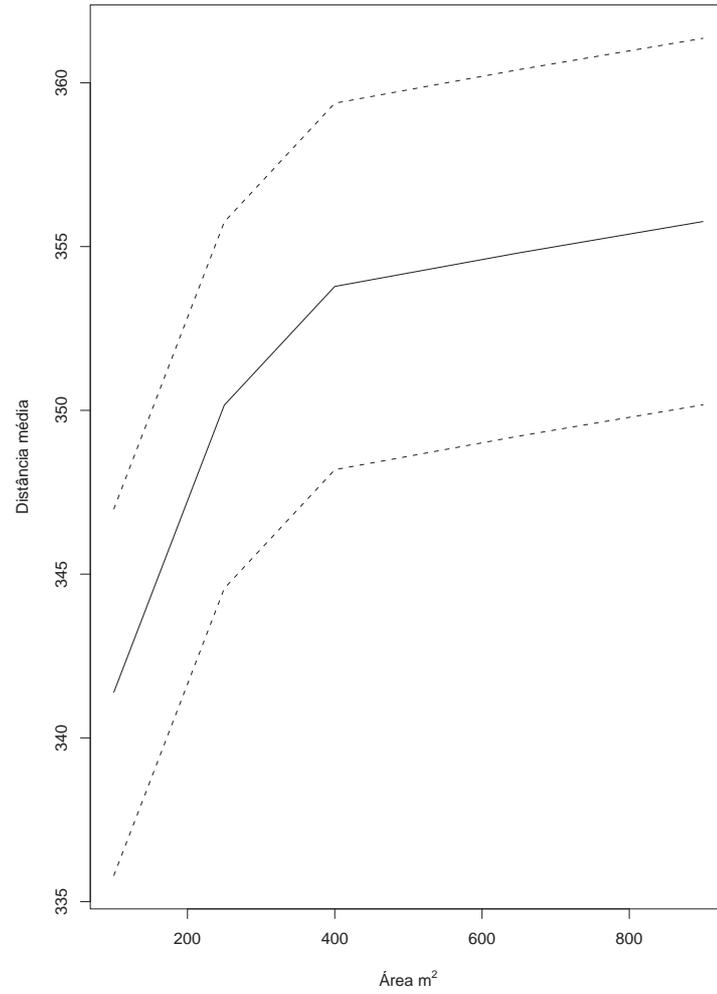


Figura 34: Distância percorrida pela informação em função da área de cobertura quando a antena está acoplada à entrada (situação 1).

em que a distância média percorrida pela antena móvel cresce.

5.2 Situação 2

Esta situação está ilustrada na Figura 32 conforme o segundo ambiente apresentado no capítulo anterior. Nas simulações realizadas para essa situação foram gerados cinco diferentes tamanhos de áreas de abrangências para as antenas fixas. Apesar da geometria (hexágono) ser diferente, as áreas de abrangência das antenas para esta situação possuem os mesmos tamanhos em metros quadrados citados na seção acima. No caso dos valores adotados para as áreas de abrangências para as antenas móveis, estes são equivalentes aos da seção acima.

A Figura 36, assim como a Figura 34, mostra o gráfico da média das distâncias máximas percorridas pela informação em função da área de abrangência da antena fixa, junto com o intervalo de confiança assintótico ao nível de 95% observado nas 100 replicações. Entretanto, para esta segunda situação a antena está localizada no extremo oposto à entrada dos móveis no cenário simulado.

Esta figura também revela que, à medida que se aumenta a área da antena, a distância percorrida pela informação aumenta, confirmando, assim, a intuição de que maiores áreas de abrangência irão resultar em maiores distâncias percorridas pela informação e, com isso, maiores custos de instalação.

Ainda analisando a Figura 36, constata-se que a maior taxa de crescimento desta média é de 23,26%, correspondente a uma variação na área de cobertura da antena de $100m^2$ para $650m^2$. Observa-se também que à medida em que cresce a área de cobertura da antena o intervalo de confiança de 95% para a média mantém-se aproximadamente o mesmo, contudo para uma área de cobertura da antena variando entre $650m^2$ e $900m^2$ o intervalo torna-se um pouco mais impreciso.

Caso seja imprescindível instalar a antena no extremo oposto à entrada dos usuários, a escolha da área de cobertura poderá ser feita em função dos resultados mostrados na Figura 36, isto é, em função da área de cobertura, bem como do custo de instalação.

As distâncias apresentadas na Figura 37 foram obtidas a partir da contaminação secundária. Esta figura mostra o gráfico da média das distâncias máximas percorridas pela informação em função da área de abrangência da antena móvel, com o intervalo de confiança

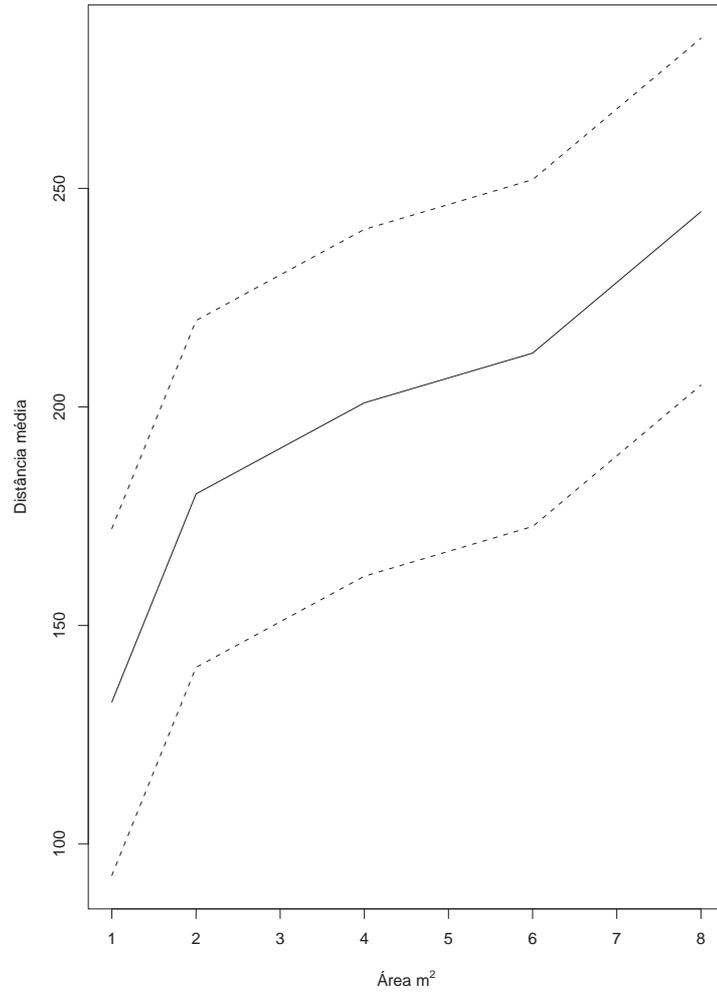


Figura 35: Distância percorrida pela informação em função da área de cobertura móvel quando a antena está em oposição à entrada (situação 1).

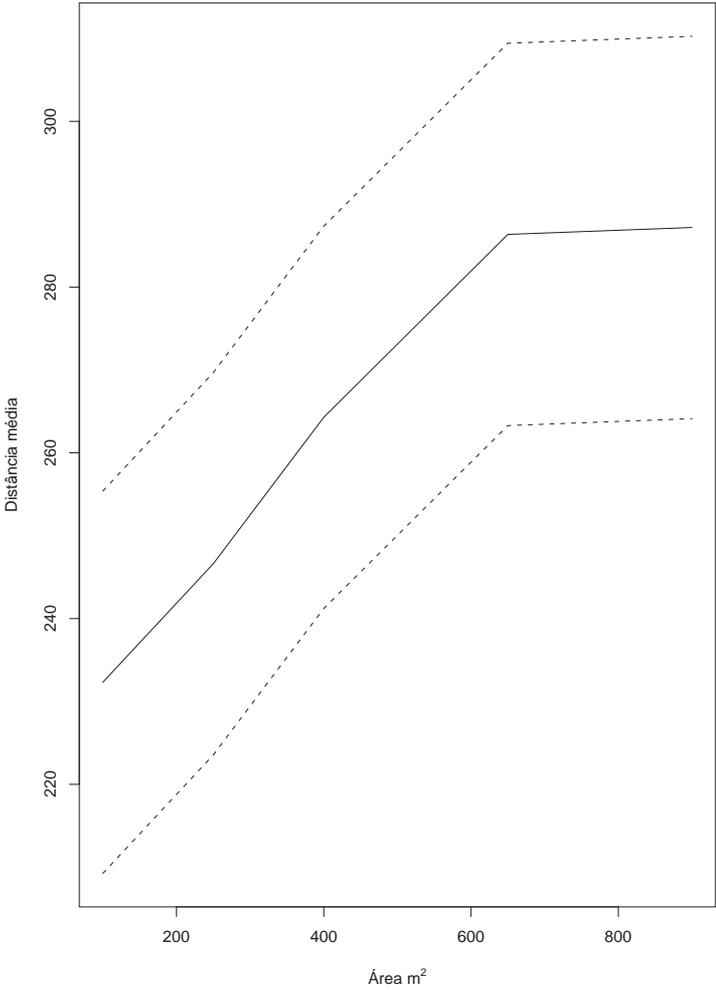


Figura 36: Distância percorrida pela informação em função da área de cobertura quando a antena está em oposição à entrada (situação 2).

assintótico ao nível 95% observado nas 100 replicações.

Esta figura mostra que o crescimento é bastante acentuado para a média das distâncias máximas percorridas pela informação, com a taxa de crescimento de uma área de abrangência variando de $1m^2$ para $4m^2$ é de 294,42%, o que significa que a média das distâncias quase triplicou. Ainda aumentando a área de abrangência para $4m^2$ ou $6m^2$ verifica-se que a taxa continua crescendo, entretanto, este crescimento não é substancial. O intervalo de confiança, para este caso, mostra-se insensível.

Realizando uma comparação entre as áreas de abrangência das antenas fixas para as duas situações acima descritas, pode-se observar que enquanto na situação 1 a maior taxa de crescimento é de 3,63% para uma área coberta de $400m^2$, na situação 2 para esta mesma área a taxa é de 13,76%. Embora a taxa referente à segunda situação seja maior, o valor da média das distâncias máximas para esta situação é inferior ao da primeira situação. Isto implica que, mesmo que a taxa de crescimento da média seja menor, a localização da antena na entrada é viável.

Observando as duas situações e, por fim, efetuando uma comparação entre as áreas de abrangência das antenas móveis, verifica-se que na primeira situação (Figura 35) os valores das médias são bastante elevados em relação aos valores observados na Figura 37. Conclui-se, então, que não importa o valor da taxa de crescimento, uma vez que a antena localizada acoplada à entrada contempla a todos os usuários a informação, fazendo com que os valores das médias das distâncias percorridas seja elevado.

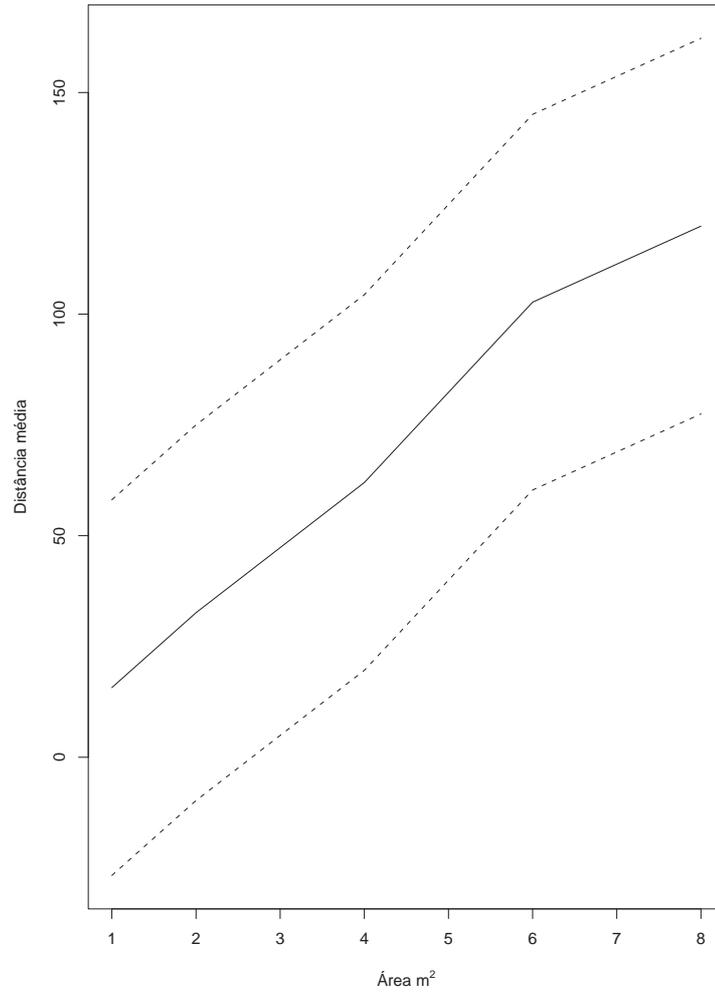


Figura 37: Distância percorrida pela informação em função da área de cobertura móvel quando a antena está em oposição à entrada (situação 2).

6 Conclusões e Trabalhos Futuros

Inicialmente foi especificado o funcionamento de uma rede móvel celular. Em seguida, uma visão geral das principais categorizações de modelos de mobilidade utilizados na análise de sistemas de comunicação sem fio foi apresentada. Além disso, foram estudados e expostos vários modelos de mobilidade existentes na literatura, a fim de escolher o que melhor representasse a mobilidade de usuários em um ambiente confinado.

Foi estudado em mais detalhes o modelo de mobilidade desenvolvido por Bettstetter (2001) utilizando a regra de borda de Almeida (2002), pois o mesmo possui parâmetros de fácil manipulação dando ao comportamento de mobilidade do usuário uma maior flexibilidade. Ou seja, estes parâmetros dão ao modelo um grande poder de representatividade do comportamento de mudança de direção e de velocidade. Foram utilizados conceitos de processos estocásticos para descrever o modelo, como também para a sua simulação.

Ao modelo proposto por Bettstetter (2001) foi acrescentado um mecanismo de contágio. Este mecanismo foi descrito estocasticamente conforme o processo de Poisson. O processo estocástico de contágio foi utilizado pois desejou-se simular o envio de propaganda via telefone celular em um ambiente fechado.

Como continuação do trabalho tem-se a idéia de simular o processo de contágio utilizando diferentes modelos de mobilidade, bem como a implementação de outras estratégias de contágio e outros ambientes de simulação.

Referências Bibliográficas

- Alencar, B. G. S. 1999, Um modelo de mobilidade de usuários para redes de comunicação móvel celular numa região metropolitana, Master's thesis, Universidade Federal de Pernambuco.
- Almeida, M. P. 2002, Efeito de bordas nos modelos de mobilidade em análise de sistemas de comunicação sem fio. Centro de Informática - Universidade Federal de Pernambuco.
- Almeida, M. P. 2003, Modelos de mobilidade em análise de sistemas de comunicação sem fio, Master's thesis, Centro de Informática - Universidade Federal de Pernambuco.
- Araújo, L. P. Marca, J. R. B. 1997, Carga e custos de sinalização em sistemas móveis digitais, *in* 'XV Simpósio Brasileiro de Telecomunicações', pp. 361–364.
- Bar-Noy, A., Kessler, I. Sidi, M. 1995, 'Mobile users: To update or not update?', *Wireless Networks Journal* **1**(2), 175–186.
- Bates, R. J. 1994, *Wireless Networked Communications: Concepts, Technology, and Implementation*, Series Advisor, McGraw-Hill.
- Bergamo, M. et al. 1996, 'System desing specification for mobile multimedia wireless network (mmwn - draft)', *Technical report* . DARPA project.
- Bettstetter, C. 2001, 'Smooth is better than sharp: A random mobility model for simulation of wireless networks', pp. 19–27.
- Bettstetter, C., Hartenstein, H. Pérez-Costa, X. 2002, 'Stochastic properties of the random waypoint mobility model: epoch length, direction distribution, and cell change rate', *Proceedings of the 5th ACM international workshop on Modeling analysis and simulation of wireless and mobile systems* pp. 07–14.
- Cavalcanti, D. A. T. 2001, Variações temporais e espaciais na alocação de canais em um sistema celular, Master's thesis, Universidade Federal de Pernambuco.
- Chandra, A., Bansal, D., Shorey, R., Kulshreshtha, A. Gupta, M. 1999, 'Characterization of mobility patterns based on cell topograpy in a cellular radio system', *IEEE International Conference on Personal Wireless Communications (ICPWC)* pp. 17–19.
- Davies, V. A. 2000, Evaluating mobility models within an ad hoc network, Master's thesis, Colorado School of Mines.

- Feher, K. 1995, *Wireless Digital Communications: modulation and spread spectrum applications*, Prentice-Hall PTR.
- Guedes, L. G. R. 1997, 'Comunicações móveis'.
<http://www.eee.ufg.br/lguedes/cm/cm.htm>
- Hong, D. Rappaport, S. S. 1986, 'Traffic model and performance analysis for cellular mobile radio telephone systems with prioritized and nonprioritized handoff procedures', *IEEE Transactions on Vehicular Technology* **35**(3), 77–92.
- Hong, X., Gerla, M., Pei, G. Chiang, C.-C. 1999, 'A group mobility model for ad hoc wireless networks', *Proceedings of the 2nd ACM international workshop on Modeling, analysis and simulation of wireless and mobile systems* pp. 53–60.
- International air traffic between United States and other countries* 1996, National Transportation Statistics. Tables 17, 18.
- Iyer, S. 2001, 'Mobility models in ad hoc networks'.
<http://www.it.iitb.ac.in/deepanshu/downloads/MobilityModels.ps>
- Karlin, S. Taylor, H. M. 1975, *A First Course in Stochastic Processes*, second edn, Academic Press, London.
- Kree, R., Schaub, B. Schmittmann, B. 1989, 'Effects of pollution on critical population dynamics', *Physical Review A* **39**(4), 2214–2221.
- Lam, D., Cox, D. C. Widom, J. 1997, 'Teletraffic modeling for personal communications services', *IEEE Communications Magazine* pp. 79–87.
- Lam, D., Jannink, J., Cox, D. C. Widom, J. 1996, 'Modeling location management in personal communications services', *IEEE International Conference on Universal Personal Communications* **2**, 596–601.
- Mateus, G. R. Loureiro, A. A. F. 1999, *Introdução à Computação Móvel*, UFMG, Belo Horizonte, MG.
- Origin and destination survey, T-100 domestic market data* 1991-1993, Dept. of Transportation. Data set for periods 10/91-12/91 and 10/93-12/93.
- Project Sumatra* 1997, Stanford University Mobile Activity TRAcEs.
<http://www.db.stanford.edu/sumatra>
- Re, E. D., Fantacci, R. Giambene, G. 1995, 'Handover and dynamic channel allocation techniques in mobile cellular networks', *IEEE Transactions on Vehicular Technology* **44**, 229–237.
- Rocha, M. N. 2001, *Simulação e Gerenciamento de Unidades Móveis em Ambientes*, PhD thesis, Universidade Federal de Minas Gerais.

- Rubin, I. Choi, C. 1997, 'Impact of the location area structure on performance of signaling channels in wireless cellular networks', *IEEE Communication Magazine* pp. 108–115.
- Sanchez, M. 1998, 'Mobility models'.
<http://www.disca.upv.es/misan/mobmodel.htm>
- Seskar, I., Holtzman, M., Maric, S. V. Wasserman, J. 1992, 'Rate of location area updates in cellular systems', *Proceedings of IEEE 42nd VTC* pp. 694–697.
- Stacy, E. W. 1962, 'A generalization of the gamma distribution', *Annals of Mathematical Statistics* **XXXIII**(3), 1187–1193.
- Stacy, E. W. Mihram, G. A. 1965, 'Parameter estimation for generalized gamma distribution', *Annals of Mathematical Statistics* **7**(3), 349–358.
- Tabbane, S. 1997, 'Location management methods for third-generation mobile systems', *IEEE Communications Magazine* .
- Thomas, R., Gilbert, H. Mazziotto, G. 1988, 'Influence of the moving of the mobile stations on the performance of a radio mobile cellular network', *Proceedings of 3rd nordic Seminar on Digital Land Mobile Radio Commun* .
- Toh, C. K. 1996, 'Performance evaluation of crossover switch discovery algorithms for wireless', *Proc. INFOCOMM* pp. 1380–1387.
- van Wijland, F., Oerding, K. Hilhorst, H. J. 1998, 'Wilson renormalization of a reaction-diffusion process', *Physical A* **251**, 179–201.
- van Wijland, F., Oerding, K., Leroy, J.-P. Hilhorst, H. J. 2000, 'Fluctuation-induced first-order transition in a nonequilibrium steady state', *Journal of Statistical Physics* **99**, 1365–1395.
- Zonoozi, M. M. Dassanayake, P. 1997a, 'A novel modelling technique for tracing mobile users in a cellular mobile communication system', *Wireless Personal Communication* **4**, 185–205.
- Zonoozi, M. M. Dassanayake, P. 1997b, 'User mobility modeling and characterization of mobility patterns', *IEEE Journal on Selected Areas in Communications* **15**(7), 1239–1252.