

Modelos Markovianos de Mobilidade Individual para Redes Móveis *Ad hoc**

Carlos Alberto V. Campos e Luís Felipe M. de Moraes

¹Laboratório de Redes de Alta Velocidade – RAVEL
Programa de Engenharia de Sistemas e Computação – COPPE/UFRJ
Caixa Postal: 68.511 – 21941-972 – Rio de Janeiro, RJ

carlosvc,moraes@cos.ufrj.br

Resumo. Modelos de Mobilidade visam representar o comportamento de movimentação dos dispositivos móveis numa rede *ad hoc*. Esses modelos são usados na avaliação do desempenho de aplicações e sistemas de comunicação, permitindo analisar o impacto causado pela mobilidade no funcionamento dos mesmos. Dentro desse contexto, propõe-se nesse artigo modelos de mobilidade individual para redes móveis *ad hoc*. Esses modelos foram baseados em [1] e tem como objetivo representar uma maior liberdade de movimentação dos dispositivos móveis. Através dos modelos aqui propostos, permitem-se movimentos na mesma direção, em direções adjacentes, acelerações e intervalos de pausa no movimento, além de evitar mudanças bruscas de direção e paradas abruptas. Dessa forma, busca-se uma maior aproximação do movimento real dos usuários num ambiente urbano e em rodovias. No artigo, os modelos são descritos analiticamente através de cadeias de Markov e são apresentadas comparações, feitas através de simulação, entre os Modelos Propostos, o Modelo Waypoint e o Modelo Markoviano de Percurso Aleatório.

Abstract. Mobility Models try to represent the movement behavior of mobile devices in Mobile Ad hoc Networks. These models are used in performance evaluation of applications and communication systems and, this way, they allow the analysis of the mobility impact. In this context, it is proposed in this paper Individual Mobility Models for Mobile Ad hoc Networks. These models were based in [1] and intend to represent a wider movement ability of devices. Using the proposed models is possible to move in the same direction, in adjacent directions, to accelerate and to stop, besides avoiding sharp turns and sudden stops. This way, it is tried a representation closer to the real movement of the users in an urban environment and in roads. In the paper, the models are described analytically by Markov Chains and are presented comparisons, by using simulation, between the Proposed Models, the Waypoint Model and the Random Walk Markovian Model.

1. Introdução

As Redes Móveis *Ad hoc* são tecnologias de comunicação sem fio, onde os dispositivos computacionais móveis são capazes de trocarem informações diretamente entre si ou através de múltiplos saltos sem a necessidade de uma infra-estrutura de comunicação [2], [3], [4]. Assim sendo, os dispositivos computacionais possuem a capacidade de serem, tanto um roteador, quanto

*Esse trabalho foi realizado com recursos da CAPES.

um dispositivo de comunicação terminal e ainda, ambos simultaneamente dando à rede a característica de auto-configuração. Sendo assim, essas redes são indicadas para situações onde não se pode, ou não é adequado, instalar uma rede fixa ou uma rede sem fio infra-estruturada como, por exemplo, uma rede de telefonia celular. Por isso, estão surgindo tecnologias como o padrão *Bluetooth* e Rede de Sensores, que são extensões de redes *ad hoc* [3]. Nesse trabalho, os dispositivos computacionais móveis serão denominados de nós móveis - NMs.

Como cenários de utilização de redes *ad hoc* pode-se citar:

- Campos de batalhas, onde, aviões, helicópteros, tanques de guerra e militares trocam informações táticas;
- Empresários compartilhando informações numa reunião;
- Vendedores comunicando-se no centro comercial de uma cidade;
- Equipes de resgate e salvamento numa situação de desastre, como furacão, terremoto ou inundação, onde estas precisam se coordenar;
- Estudantes usando computadores portáteis para participar de uma aula interativa.

Uma rota entre dois NMs, numa rede *ad hoc*, pode ser formada por um ou vários saltos através dos NMs na rede. Um dos principais problemas em redes *ad hoc* é determinar e manter as rotas, já que a mobilidade de um NM pode causar mudanças na topologia. Por isso vários protocolos e algoritmos de roteamento foram e estão sendo propostos e desenvolvidos para realizar esta tarefa de maneira mais eficiente.

Para avaliar o desempenho de um protocolo de roteamento [4], [5] são necessárias várias análises em relação ao alcance de transmissão dos NMs, características do tráfego, tamanho dos *buffers* para o armazenamento das mensagens e padrões de movimento dos usuários da rede. Nesse artigo, será abordado com um nível maior de detalhamento o último tópico de avaliação que são os padrões de movimentação dos usuários.

Atualmente existem duas maneiras de se representar padrões de movimento de usuários de uma rede móvel [4]. Uma forma é através da captura de informações do comportamento real de movimentação do NM, ou seja, com o uso de registros (*traces*). A outra maneira é através de modelos de mobilidade, onde tenta-se representar o comportamento de movimentação dos nós sem o uso desses registros de movimentação.

A captura dos registros de movimentação possibilita uma observação do comportamento real de movimentação dos NMs, principalmente quando se tem um grande número de nós durante um longo período de observação. Entretanto, em ambientes muito dinâmicos, como em redes *ad hoc*, capturar esses registros não é uma tarefa fácil e quando se trata de dados confidenciais há uma dificuldade maior de acesso aos mesmos. Com isso é necessário a utilização dos modelos de mobilidade. Esses modelos possuem duas categorias [4], [5]: modelos para redes de telefonia celular e modelos para redes *ad hoc*. Nesse artigo serão descritos somente os modelos de mobilidade para redes *ad hoc*.

O presente artigo está organizado da seguinte forma. Na seção 2, são descritos os principais modelos de mobilidade individual e em grupo para redes *ad hoc*. Na seção 3, são apresentados os modelos markovianos individuais propostos, através de uma modelagem analítica. A avaliação dos modelos através de simulações e resultados obtidos, são descritos na seção 4. Por fim, as conclusões e trabalhos futuros são apresentados na seção 5.

2. Modelos de Mobilidade para Redes *Ad hoc*

Como foi dito anteriormente, os Modelos de Mobilidade para Redes *Ad hoc* buscam representar o comportamento de movimentação dos NMs numa rede *ad hoc*. Esses modelos são

usados na avaliação do desempenho de aplicações e sistemas de comunicação, permitindo analisar o impacto causado pela mobilidade no funcionamento dos mesmos. Tem-se como exemplo de ambientes onde se aplicam os modelos de mobilidade: aplicações de gerenciamento de distribuição de chave criptográfica, suporte à descoberta de serviços, suporte ao gerenciamento do tráfego suportado pela rede, avaliação da perda de pacotes em redes *ad hoc* [6], avaliação dos protocolos de roteamento [4], [7], predição do particionamento das redes *ad hoc* [8], cobertura de serviços em redes *ad hoc* particionáveis [9] e em protocolos de acesso ao meio para redes *ad hoc*. Esses modelos são classificados em dois tipos: modelos de mobilidade individual e modelos de mobilidade em grupo.

2.1. Modelos de Mobilidade Individual

São modelos que representam o comportamento de movimentação de um NM de forma independente do restante dos NMs da rede. Consiste numa modelagem mais simples e de fácil implementação. Devido a tais características, esses modelos são os mais usados na literatura para avaliação de sistemas para redes *ad hoc*[4].

Os Modelos de Mobilidade Individual têm importante aplicação na predição da disponibilidade dos enlaces sem fio, afim de melhorar, como por exemplo, a eficiência dos algoritmos de roteamento e construção de rotas mais estáveis. A causa de mudanças na disponibilidade dos enlaces sem fio são as mudanças locais na topologia da rede.

2.1.1. Modelo de Mobilidade Aleatória

O Modelo de Mobilidade Aleatória é o modelo de mobilidade de percurso aleatório (*Random Walk Mobility Model*) [10], [11] para as redes de telefonia celular e que também é aplicado em redes *ad hoc*. Ainda hoje, é um dos modelos mais utilizados pelos pesquisadores para avaliação de protocolos em redes *ad hoc* [5]. Ele tem a seguinte característica: a direção e velocidade do movimento num novo instante de tempo não tem relação nenhuma com os valores de instantes anteriores, ou seja, é um modelo de mobilidade sem memória. Por isso, esse modelo pode gerar um comportamento não realístico, por exemplo com mudanças bruscas de direção, paradas abruptas e acelerações bruscas no movimento do NM.

Algumas modificações para esse modelo têm sido propostas. Por exemplo, em [12], os NMs possuem uma direção aleatória, mas uma velocidade constante durante todo o tempo de simulação. Em [13], os NMs percorrem um caminho que é formado de vários segmentos. O tamanho desses segmentos segue uma distribuição exponencial, a direção de cada segmento é escolhida de forma aleatória e a velocidade é uniformemente distribuída entre $[1, n]$.

2.1.2. Modelo de Mobilidade Waypoint

O Modelo de Mobilidade *Waypoint*, descrito em [14], divide o percurso de um NM em períodos de movimentação e pausa. O NM fica num local por um determinado intervalo de tempo e depois move-se para um novo local escolhido aleatoriamente com uma velocidade que segue uma distribuição uniforme entre $[\text{minspeed}, \text{maxspeed}]$, conforme pode ser visto na figura 1.

Esse modelo também é sem memória, com isso ele possui as desvantagens descritas na seção 2.1.1. Apesar disso, ele também é um modelo de mobilidade muito usado pelos pesquisadores devido a sua simplicidade de implementação. Através da configuração do inter-

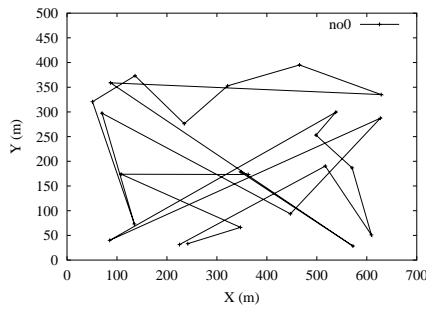


Figura 1: Percurso do no0 usando o Waypoint.

valo do tempo de pausa em zero, esse modelo se comporta de forma semelhante ao modelo de mobilidade aleatória.

2.1.3. Modelo Markoviano de Percurso Aleatório

O Modelo Markoviano de Percurso Aleatório - MPA foi proposto por Chiang em [1], onde o movimento é modelado através de uma Cadeia de Markov, e portanto, ele é um modelo de mobilidade com memória. Esse modelo possui três estados para representar as coordenadas x e y . O estado zero (0) representa a posição atual do NM em x e y , o estado um (1) representa a posição anterior do NM em x e y , e o estado dois (2) representa a próxima posição do NM também em x e y , conforme mostrado na figura 2. O modelo utiliza a seguinte matriz de probabilidade de transição para determinar a posição de um NM específico no próximo instante de tempo.

$$P = \begin{bmatrix} P(0,0) & P(0,1) & P(0,2) \\ P(1,0) & P(1,1) & P(1,2) \\ P(2,0) & P(2,1) & P(2,2) \end{bmatrix}$$

Nessa matriz, cada elemento $P(a,b)$ representa a probabilidade de mudança do estado a para o estado b . Em [1] são usados os seguintes valores (matriz P_1) para a transição de estados e que são ilustrados na figura 2.

$$P_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0,5 & 0,5 \\ 0,3 & 0,7 & 0 \\ 0,3 & 0 & 0,7 \end{bmatrix}$$

Nesse modelo os NMs têm a possibilidade de movimentação somente nas diagonais, pois a probabilidade de transição de $P(0,0) = 0$. Com isso, não é possível movimentar-se para as direções vertical e horizontal ou ficar parado numa posição qualquer. Além disso, a probabilidade do movimento continuar na mesma direção é maior que a de mudar de direção, fazendo com que o NM, uma vez em movimento, tenda a permanecer na mesma direção. Outra característica desse modelo é que ele não permite mudanças bruscas de sentido no movimento, pois para o NM mudar o sentido do movimento é necessário parar o movimento para depois mudar de sentido. Essas características mostram que esse modelo é mais realístico que os modelos Percurso Aleatório e Waypoint.

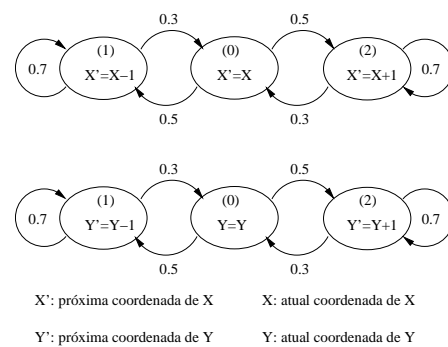


Figura 2: Modelo de Mobilidade MPA.

Existem outros modelos de mobilidade individual propostos na literatura. Em [4], é apresentado um modelo com uma área de simulação sem fronteira. No trabalho [5], é descrito o modelo de mobilidade *Gauss-Markov* utilizado em redes *ad hoc*. O modelo de mobilidade *City Section* é proposto em [4], onde busca-se representar a movimentação de NMs numa área urbana.

2.2. Modelos de Mobilidade em Grupo

Os Modelos de Mobilidade em Grupo são modelos que representam o movimento de um grupo de NMs, onde o comportamento de movimentação dos NMs é dependente, tanto em relação a intervalos de tempo quanto ao relacionamento entre eles. Além desses modelos serem utilizados para predizerem a disponibilidade do enlace sem fio, recentemente estão sendo usados também na predição do particionamento das redes *ad hoc*, que são mudanças de escala global na topologia da rede [8]. A principal causa desse particionamento é o próprio comportamento de movimentação em grupo dos NMs.

2.2.1. Modelo de Mobilidade de Grupo com Ponto de Referência - MMGPR

Esse modelo foi desenvolvido por Hong *et al.* em [5]. Nele cada grupo tem um centro de referência lógico. O movimento do centro define o comportamento de todo o grupo incluindo localização, velocidade, direção, aceleração etc. Desse modo, a trajetória do grupo é composta por um caminho até o centro. Os NMs são distribuídos uniformemente dentro da área geográfica do grupo. Para cada NM, é atribuído um ponto de referência, aos quais, segue o movimento do grupo. Um NM é colocado aleatoriamente na vizinhança do ponto de referência. O esquema de referência num ponto admite o comportamento de movimentação aleatória independente para cada NM, além do movimento do grupo.

Na figura 3 é ilustrado o MMGPR com dois grupos. Cada grupo tem um vetor de movimentação de grupo \vec{V}_{g_i} . Na movimentação do NM A , o ponto de referência move de $PR(\tau)$ para $PR(\tau + 1)$ com o vetor de movimentação do grupo $\vec{MG} = \vec{V}_{g_1}$. Então, a nova posição do NM é gerada adicionando o vetor de movimentação aleatória \vec{MA} para o novo ponto de referência $PR(\tau + 1)$. Esse vetor tem o comprimento seguindo uma distribuição uniforme dentro de um certo raio centrado no ponto de referência e a direção distribuída uniformemente entre 0° e 360° . Além disso, o vetor é independente da localização anterior do nó.

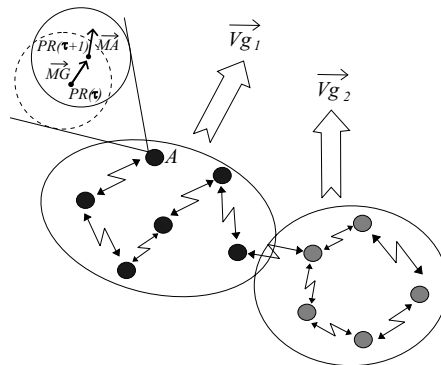


Figura 3: Modelo MGPR.

O MMGPR define o movimento de grupo explicitamente, dando um caminho do movimento para cada grupo. Esse caminho será dado definindo uma seqüência de *checkpoints* (pontos de verificação) ao longo da trajetória correspondendo a um intervalo de tempo. Em cada tempo,

o centro do grupo procura um novo *checkpoint* e calcula o novo vetor de movimentação de grupo \vec{V}_{gi} , o próximo local do *checkpoint* e seu intervalo de tempo.

Esse modelo é usado nas seguintes aplicações:

- Grupos em diferentes áreas executando a mesma tarefa, como em campos de batalha ou em recuperação de desastres. Nesses cenários, os grupos têm o mesmo vetor de movimentação \vec{V}_{gi} ;
- Diferentes grupos executando tarefas diferentes sobre a mesma área, ou seja, grupos com padrões de mobilidade diferentes na mesma região, onde cada grupo possui um vetor de movimentação \vec{V}_{gi} distinto.

3. Propostas de Modelos de Mobilidade Individual

Como foi descrito na seção 2.1.3, o Modelo de Mobilidade MPA tenta descrever um movimento com o comportamento mais realístico que os modelos de Mobilidade Aleatória e *Waypoint*. Entretanto, ele não permite movimentar-se na vertical e horizontal, ou ficar parado numa posição qualquer. Além disso, esse modelo não suporta mudanças de velocidade na mesma direção.

Nesse trabalho é proposto um conjunto de modelos de mobilidade que tratam os problemas apresentados e são indicados para representar a mobilidade de NMs em ambientes urbanos e rodovias. Esses modelos foram baseados em [1], sendo também processos Markovianos [15]. Os modelos propostos serão descritos em detalhes nas seções abaixo.

3.1. Modelo A

Esse modelo usa uma cadeia de Markov com parâmetro de tempo discreto que permite movimentos nas direções vertical e horizontal, além de paradas no movimento dos NMs durante um ou mais intervalos de tempo, mas, suporta uma única velocidade na mesma direção. O modelo A utiliza a matriz de probabilidade de transição P_A , descrita a seguir:

$$P_A = \begin{bmatrix} 0,2 & 0,4 & 0,4 \\ 0,3 & 0,7 & 0 \\ 0,3 & 0 & 0,7 \end{bmatrix}$$

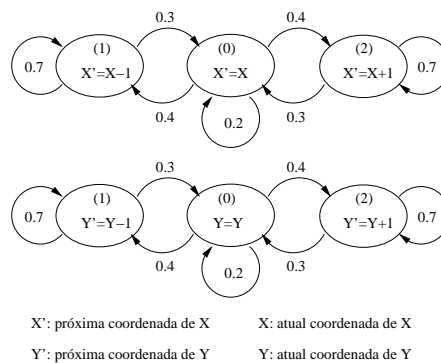


Figura 4: Diagrama de transições de estado do Modelo A.

Na figura 4 é mostrado o diagrama de transições de estados do Modelo A que é uma extensão do Modelo MPA. Como pode ser visto nessa figura, o modelo apresenta uma nova característica que permitiu a transição do estado (0) para o próprio estado (0) com uma probabilidade de

0, 2, possibilitando que o NM permaneça na mesma posição em x ou y em um ou mais instantes de tempo. Dessa forma, o modelo permite ainda que o NM fique parado, ou seja, a posição em x e y não muda em um ou mais instantes de tempo.

O modelo proposto em [1], possui uma cadeia de Markov para a coordenada x e uma outra para y . Usar esse modelo para representar o movimento do NM é necessário que se faça uma combinação das duas cadeias: x e y . Para facilitar a visualização do funcionamento e a implementação do modelo, propõe-se a utilização de uma cadeia de Markov contendo dois eventos em cada estado, que é exatamente a representação da posição do NM nas coordenadas x e y . Na figura 5 são representadas todas as possíveis transições no movimento do NM, com as

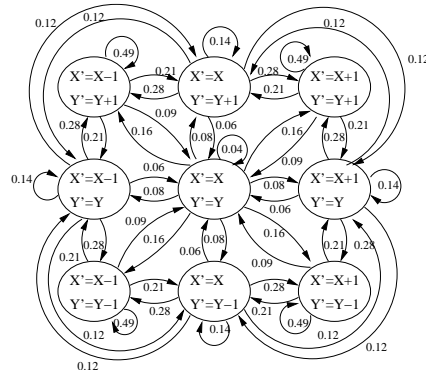


Figura 5: Diagrama de transição de estado com 2 eventos (eixo x e y)

suas respectivas probabilidades de transição. A partir dessa figura, pode-se observar as seguintes características do modelo A:

1. A probabilidade de um NM ficar parado em mais de um instante de tempo é igual a 0,04, a qual é considerada muito pequena se comparada com as demais probabilidades.
2. A probabilidade de um NM permanecer movimentando-se na vertical ou na horizontal em mais de um instante de tempo com o valor igual a 0,14 representa uma pequena movimentação nessas direções.
3. A probabilidade de permanecer movimentando-se nas diagonais em mais de um instante de tempo com o valor de 0,49 é, comparativamente, alta. Isso descreve uma intensa movimentação nessas direções.

Com essas características, o Modelo A representa uma intensa movimentação nas diagonais, pouca movimentação na horizontal e na vertical e raríssimas paradas, conforme é ilustrado na figura 6.

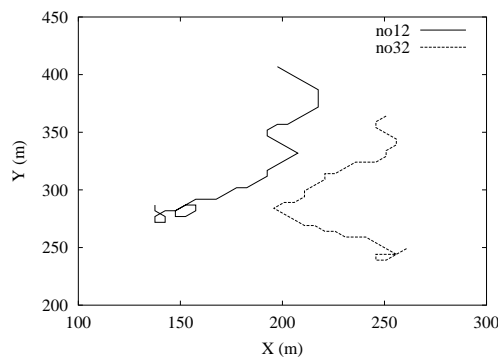


Figura 6: Percurso de dois nós usando o Modelo A.

3.2. Modelo B

Na maioria dos cenários em que se utiliza uma rede *ad hoc*, os NMs movimentam-se variando a sua velocidade. Para representar esses cenários, propõe-se um modelo markoviano que suporta várias velocidades. Nesse modelo é atribuído um conjunto de valores do incremento na posição inicial, que variará entre $[1, n]$, ou seja, o incremento corresponde à velocidade que o NM usa para mudar da posição atual que é X para a próxima posição que é X' . A variação do valor da velocidade segue o comportamento de uma série geométrica, onde o valor inicial é 1 e o valor máximo é n , então têm-se:

$n \rightarrow$ número máximo de incremento de passos, onde,

$$0 < n < \infty \quad | \quad n = 2^x; \quad x \in \mathbb{N} \quad (1)$$

Dessa forma, pode-se representar n da seguinte maneira:

$$n = 2^{\log_2 n} \quad (2)$$

A próxima posição do NM é calculada da seguinte forma:

$$X' = X + s \cdot 2^v, \quad 0 \leq v \leq \log_2 n \quad \wedge \quad s = \{-1, 0, 1\} \quad \wedge \quad s, v \in \mathbb{Z} \quad (3)$$

Onde s representa o sentido do movimento com os valores de -1 para o sentido oposto ao da posição anterior, 0 para representar que o NM está na mesma posição e 1 representando o mesmo sentido de movimento do NM na posição anterior. O valor v representa o expoente do incremento dado à próxima posição do NM.

Depois de definidas as variáveis usadas para modificar a posição do NM descritas nas equações (1), (2), (3), serão abordados os valores das probabilidades de transição de estado do Modelo B. Cada estado da cadeia da figura 7, com exceção dos estados $(-e, e)$, terá os seguintes valores de probabilidade de transição:

- Para permanecer no estado atual o valor é igual a 0,2, conforme definido na equação (4);
- A soma de todas as probabilidades de mudança para qualquer estado à direita do estado atual é igual a 0,4, conforme ilustrado na figura 7. Esse valor está definido na equação (5) para o estado (0), na equação (6) para os estados positivos e na equação (7) para os estados negativos;
- A soma de todas as probabilidades de mudança para qualquer estado à esquerda é igual a 0,4, conforme ilustrado na figura 7. Esse valor está definido na equação (5) para o estado (0), na equação (6) para os estados negativos e na equação (7) para os estados positivos.

$$P[X'(t) = X(t) + s \cdot 2^v | X'(t-1) = X(t-1) + s \cdot 2^v] = 0,2 \quad (4)$$

$$0 \leq v < \log_2 n \quad \wedge \quad -1 \leq s \leq 1$$

$$\sum_{v=0}^{\log_2 n} P[X'(t) = X(t) + s \cdot 2^v | X'(t-1) = X(t-1)] = 0,4 \quad s = \{-1, 1\} \quad (5)$$

$$\sum_{v=k+1}^{\log_2 n} P[X'(t) = X(t) + s \cdot 2^v | X'(t-1) = X(t-1) + s \cdot 2^k] = 0,4 \quad (6)$$

$$0 < k \leq \log_2 n \quad , \quad s = \{-1, 1\} \quad \wedge \quad k \in \mathbb{Z}$$

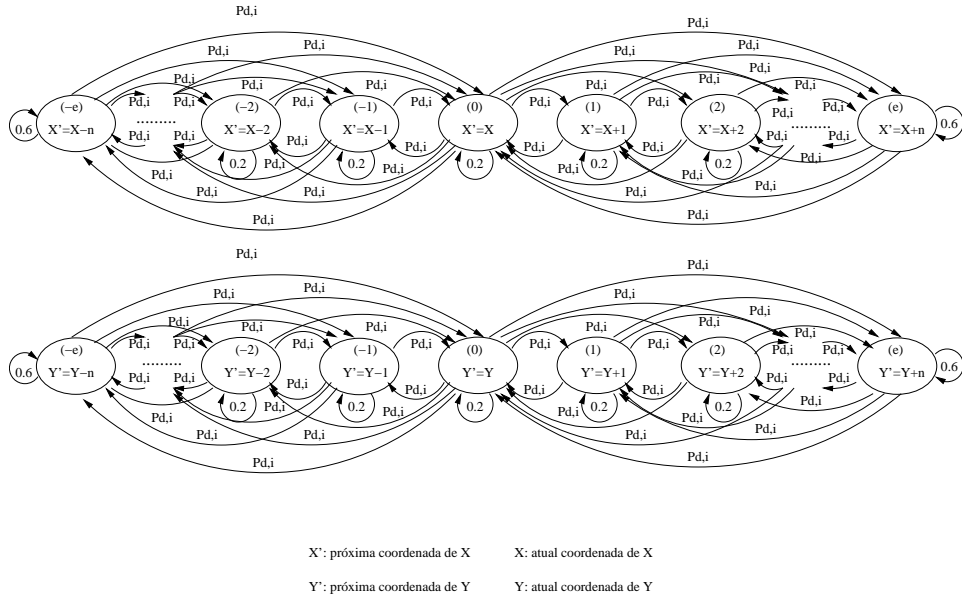


Figura 7: Diagrama de transição de estado do Modelo B

$$\begin{aligned}
 & \left(\sum_{v=0}^{k-1} P[X'(t) = X(t) + s \cdot 2^v | X'(t-1) = X(t-1) + s \cdot 2^k] \right) + P[X'(t) = X(t) | \\
 & X'(t-1) = X(t-1) + s \cdot 2^k] = 0,4, \quad 0 < k < \log_2 n \quad \wedge \quad s = \{-1, 1\}
 \end{aligned} \tag{7}$$

Como os estados $(-e, e)$ são as extremidades do Modelo B, mostrado na figura 7, eles possuem uma diferença em relação aos outros estados. O estado $(-e)$ só possui a possibilidade de mudar para um outro estado a sua direita, onde a soma de todos os possíveis valores probabilísticos é igual a 0,4, conforme definido na equação (7) ou permanecer nele mesmo com valor probabilístico de 0.6, conforme a equação (8). De forma simétrica, o estado (e) só possui a possibilidade de mudar para um outro estado a sua esquerda, onde a soma de todos os possíveis valores probabilísticos também é igual a 0,4, conforme definido na equação (7) ou pode permanecer nele mesmo com probabilidade igual a 0.6, como definido na equação (8).

$$P[X'(t) = X(t) + s \cdot n | X'(t-1) = X(t-1) + s \cdot n] = 0,6, \quad s = \{-1, 1\} \tag{8}$$

Para calcular a probabilidade de transição de um estado (i) para um outro qualquer, de acordo com a figura 7, procede-se da seguinte maneira:

- $P_{d,i}$ é a probabilidade de no instante t estar no estado (d) , dado que no instante $t-1$ estava no estado (i) ;
- m é o valor de todas as probabilidades de mudança, do estados (i) , para qualquer estado à sua direita. Também é usado para o valor que representa todas as mudanças à esquerda.

Usando essa notação, as equações (4), (5), (6), (7) e (8) foram reformuladas a seguir, nas equações (9), (10), (11), (12) e (13), respectivamente:

$$P_{i,i} = 1 - 2m, \tag{9}$$

$$\sum_{v=0}^{\log_2 n} P_{v,0} = m, \tag{10}$$

$$\sum_{v=\frac{|k|}{k}(|k|+1)}^{\frac{|k|}{k} \log_2 n} P_{v,k} = m, \quad (11)$$

$$\sum_{v=0}^{\frac{|k|}{k}(|k|-1)} P_{v,k} = m, \quad 0 < |k| < \log_2 n, \quad (12)$$

$$P_{e,e} = P_{-e,-e} = 1 - m, \quad (13)$$

Na equação abaixo, tem-se a fórmula geral da $P_{d,i}$ somente em função de $P_{i+1,i}$.

$$P_{d,i} = \frac{P_{i+1,i}}{2^{|d|-1}}, \quad (14)$$

Assim sendo, $P_{i+1,i}$ pode ser definida através da soma de todas as possibilidades de mudanças à direita ou à esquerda, pois, seguem uma série geométrica de razão igual a $\frac{1}{2}$, como descrita na equação (15):

$$P_{i+1,i} + \frac{1}{2}P_{i+1,i} + \frac{1}{4}P_{i+1,i} + \cdots + \frac{1}{n}P_{i+1,i} = m \quad (15)$$

Na equação (16), a fórmula geral da $P_{i+1,i}$ é dada somente em função de m , definida na equação (10), e n definida na equação (1).

$$P_{i+1,i} = \frac{m \cdot n}{2n - 1}, \quad i = 0, \quad (16)$$

Para qualquer outra $P_{d,i}$, onde, $i = 0$, tem-se a equação (17):

$$P[X'(t) = X(t) + \frac{|d| \cdot 2^{|d|-1}}{d} | X'(t-1) = X(t-1)], \quad d > 0; \quad (17)$$

Na equação (18), é dada a soma de todas as $P_{d,i}$ em função de $P_{i+1,i}$ da figura 7 igual a um valor de probabilidade representado por m .

$$\sum_{v=0}^{\log_2 n - i - 1} \frac{P_{i+1,i}}{2^v} = m, \quad v > 0, \quad (18)$$

Dessa maneira, $P_{i+1,i}$ pode ser definida através da soma de todas as possibilidades de mudanças à direita ou à esquerda, pois, também seguem uma série geométrica de razão igual a $\frac{1}{2}$, como descrita na equação (19):

$$P_{i+1,i} + \frac{1}{2}P_{i+1,i} + \frac{1}{4}P_{i+1,i} + \cdots + \frac{2^{i+1}}{n}P_{i+1,i} = m, \quad (19)$$

Na equação (20), a fórmula geral da $P_{i+1,i}$ é dada somente em função de m , definida na equação (10), e n , definida na equação (1).

$$P_{i+1,i} = \frac{m \cdot n}{2(n - 2^i)}, \quad i \neq 0, \quad (20)$$

Como mostrado analiticamente ao longo dessa seção, o modelo apresentado possui as seguintes características:

- A distribuição das probabilidades de um estado (i) segue uma série geométrica de razão $\frac{1}{2}$, ou seja, o valor de $P_{\frac{|i|}{i}(|i|+2),i}$ é a metade do valor de $P_{\frac{|i|}{i}(|i|+1),i}$, $|i| > 0$;

- A velocidade aumenta exponencialmente até o valor máximo n ;
- Estando num estado ($i \rightarrow \text{positivo}$), não é possível passar para um estado ($i \rightarrow \text{negativo}$) sem passar pelo estado (0) e vice-versa. Através dessa característica, o Modelo B evita mudanças bruscas de direção.

Além dessas características, o Modelo B tem a capacidade de representar tanto padrões de movimentação de apenas um incremento nas coordenadas x e y (como por exemplo o Modelo A), como diferentes valores de incrementos nessas coordenadas. Sendo assim, o Modelo B é genérico, possibilitando representar vários padrões de movimentação.

4. Avaliação do Modelo Proposto

Na seção 3, foi apresentada a modelagem analítica dos modelos A e B propostos. Para avaliação da modelagem apresentada, o modelo A foi analisado através de simulações. Nas seções abaixo serão descritas as métricas usadas na avaliação, as características e parâmetros das simulações e os resultados obtidos.

4.1. Métricas

Foram escolhidas algumas métricas que se mostraram apropriadas para avaliação comparativa entre esse trabalho e outros modelos propostos na literatura, a saber: mudanças bruscas de direção, paradas abruptas e acelerações bruscas, variações bruscas de velocidade. Cada métrica será definida a seguir.

Nesse trabalho foi definido que uma mudança de direção é brusca quando o ângulo de mudança de direção do movimento estiver no intervalo $[90^\circ, 180^\circ]$ ou $[135^\circ, 180^\circ]$. Essa métrica avalia se as mudanças de direção são suaves ou não.

Paradas abruptas no movimento é caracterizada por uma desaceleração muito rápida do NM fazendo com que a sua velocidade chegue a zero muito rapidamente. Para que uma parada seja considerada brusca, duas condições devem ser satisfeitas. Primeira, um NM que no instante de tempo (t) possuía uma velocidade v , ao passar para o instante de tempo ($t + 1$) sua velocidade deve se igualar a zero. Segunda, sua ΔV (variação de velocidade) deve ser maior ou igual a 50% da velocidade máxima simulada.

Acelerações bruscas possuem uma definição semelhante a de paradas abruptas, porém com uma aceleração positiva. Novamente devem ser consideradas duas condições para que uma aceleração no movimento seja considerada brusca. Primeira, no instante de tempo (t), o NM possuía uma velocidade igual a zero e ao passar para o instante de tempo ($t + 1$) a sua velocidade alcança o valor v . Segunda, sua ΔV deve ser maior ou igual a 50% da velocidade máxima simulada.

Variações bruscas de velocidade é a métrica definida pela ΔV de um NM. ΔV é calculada a partir da diferença entre a velocidade v_{t+1} e v_t , as quais ocorrem nos instantes de tempo ($t + 1$) e (t), respectivamente. ΔV é considerada brusca se seu valor for maior ou igual a 50% da velocidade máxima simulada, onde v_t e v_{t+1} são definidas no intervalo $[0, \text{velocidade máxima simulada}]$.

4.2. Simulação

Foi utilizado o gerador de cenários de mobilidade ScenGen [16] que gera uma saída configurada para o uso no simulador de rede NS-2 [17]. O desenvolvimento de novos modelos no ScenGen é feita através da linguagem de programação C++. Dessa forma, o Modelo A foi adicionado ao conjunto de modelos disponíveis dessa ferramenta. Foram avaliados os modelos: *Waypoint*, Modelo MPA e o Modelo A. O cenário de simulação foi composto por uma área de 700 x 500

metros, com 50 NM inicialmente posicionados aleatoriamente. Foram realizadas 100 simulações para cada modelo com o nível de confiança igual a 0,95.

4.3. Resultados Obtidos

Conforme descrito na seção 2.1.2, o tempo de movimentação de um NM no Modelo *Waypoint* é variável e está diretamente relacionado ao valor de sua velocidade e tamanho da área de simulação. Assim sendo, a quantidade de mudanças de direção do movimento e a variação da velocidade de um determinado NM durante um período de tempo, não é um valor constante. Além disso, o tempo de movimentação de um NM no Modelo MPA e nos Modelos Propostos é constante. Dessa forma, quando observa-se o número de mudanças de direção e de velocidade nos três modelos com o intuito de compará-los, o tempo de simulação para cada modelo será o suficiente para que ocorram exatamente 1000 mudanças de direção no movimento do NM. Esse valor foi escolhido por facilitar a apresentação e comparação dos resultados.

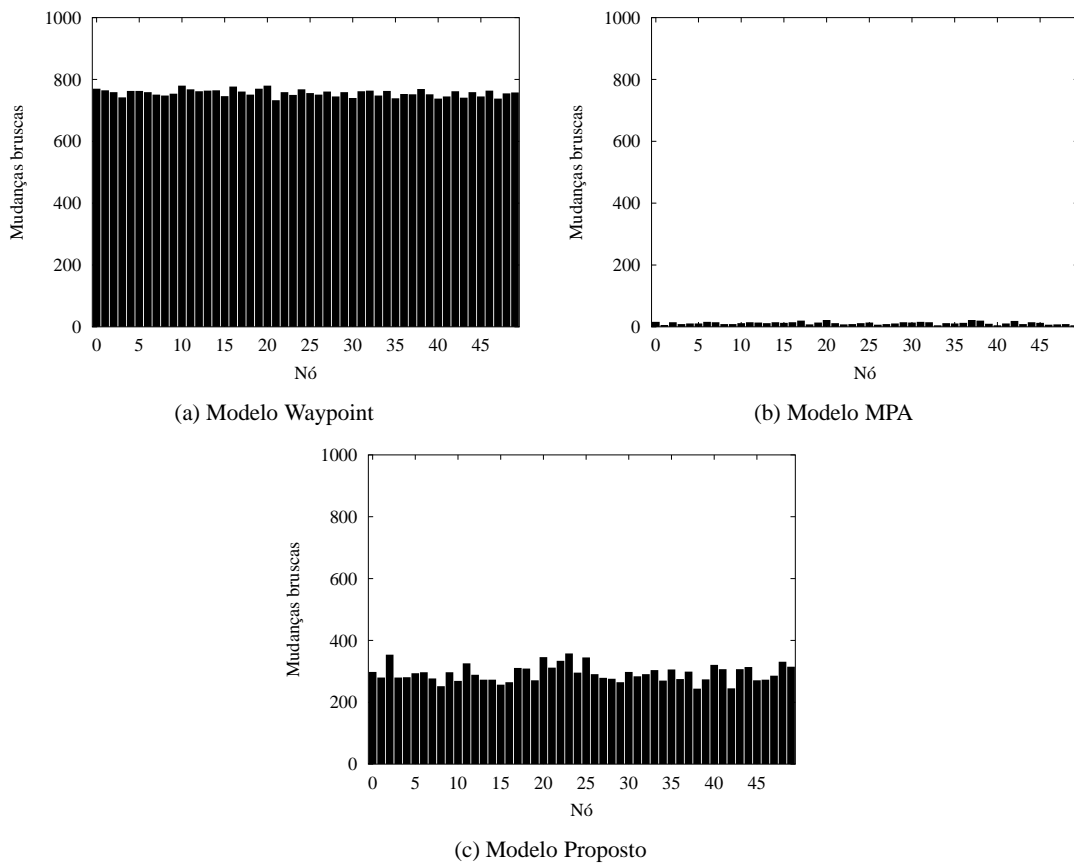


Figura 8: Número de mudanças bruscas com o ângulo de mudança de direção $\geq 90^\circ$

Na figura 8 são apresentados os gráficos que mostram o número de mudanças bruscas, quando o ângulo de mudança de direção for igual ou maior que 90° . No Modelo *Waypoint*, as mudanças de direção são uniformemente distribuídas no intervalo $[0^\circ, 180^\circ]$, onde o valor de mudanças bruscas seria de aproximadamente 50% do total das mudanças, sob condições ideais (área de movimentação ilimitada). Entretanto, os resultados obtidos nas simulações foram de aproximadamente 75%. Isso ocorre por dois fatores: a área é limitada e, portanto, há situações em que o NM alcança a borda da área de simulação. Logo, seu movimento é finalizado e é escolhido aleatoriamente uma nova velocidade e posição seguindo uma distribuição uniforme, dentro da área

de simulação. Esse comportamento aumenta a probabilidade de mudanças bruscas. O outro fator é o valor da velocidade na área de simulação. Quanto maior for esse valor, maior será a possibilidade do NM atingir a borda, fazendo com que a probabilidade de mudanças de direção aumente e, conseqüentemente, a de mudanças bruscas também.

No Modelo MPA, as mudanças bruscas foram de aproximadamente 3%, valor que já era esperado devido as características do modelo de ser com memória, possibilitar raríssimas paradas e poucos movimentos na vertical e horizontal, fazendo com que o movimento seja suave e basicamente nas diagonais. Para o modelo proposto também obteve-se o resultado desejado. Como é ilustrado na figura 8, cerca de 30% das mudanças foram bruscas. De forma semelhante ao Modelo MPA, o Modelo Proposto também é com memória. Além disso, o Modelo Proposto adiciona a capacidade de movimentação na vertical e horizontal. Essas características fazem com que a probabilidade de mudanças bruscas desse modelo possua um valor intermediário entre os modelos MPA e *Waypoint*. Portanto, o valor de probabilidade obtido confirma a modelagem analítica.

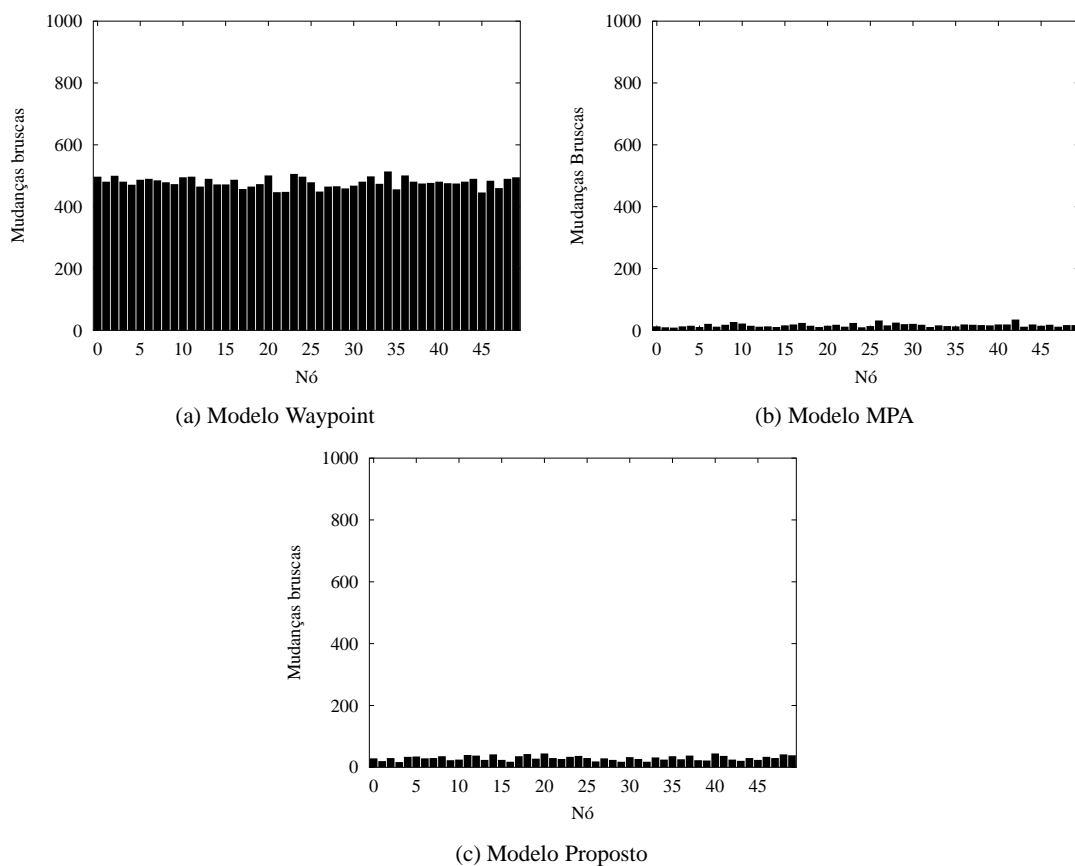


Figura 9: Número de mudanças bruscas com o ângulo de mudança de direção $\geq 135^\circ$.

Na figura 9, o ângulo de mudança de direção é igual ou maior que 135° , ou seja, a mudança de direção é mais brusca ainda. Novamente, os resultados obtidos por simulação para o Modelo *Waypoint*, apresentaram um valor de probabilidade superior ao inferido analiticamente. A justificativa para tanto é a mesma descrita anteriormente. O valor probabilístico obtido foi de aproximadamente 47% (usando área limitada), enquanto que o esperado seria inferior a 30% (área ilimitada). Para os Modelos Proposto e MPA foram obtidos valores que se mantiveram abaixo de 5%, confirmando a abordagem analítica. Esse resultado era esperado, uma vez que um baixo valor probabilístico está associado ao ângulo de mudança de direção igual a 180° no Modelo MPA e aos

ângulos 135° e 180° para o Modelo Proposto.

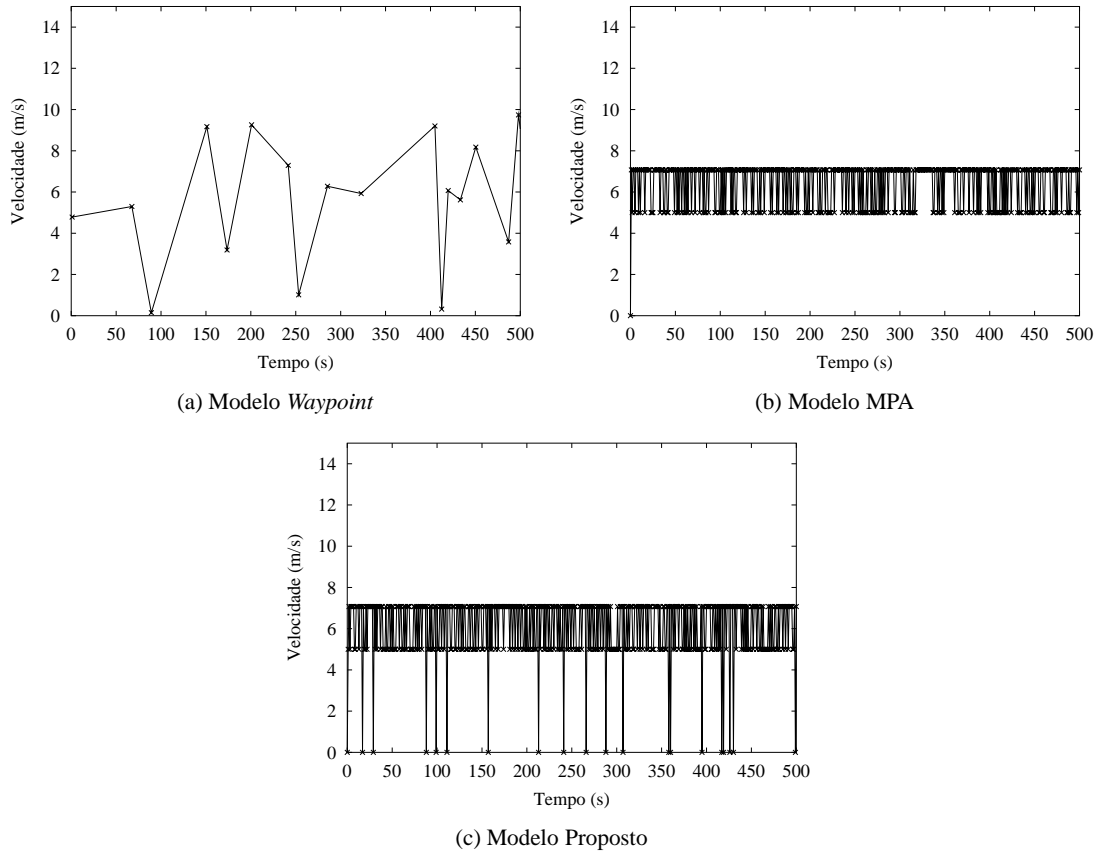


Figura 10: Variação da velocidade média.

A métrica variação de velocidade é importante nos padrões de mobilidade que não suportam grandes mudanças de velocidade, como por exemplo a movimentação de pessoas no centro de uma cidade ou para padrões que possuam mudanças de velocidade, como um automóvel movendo-se por uma rodovia. Entretanto, essas mudanças devem ser suaves na maioria das vezes. Assim sendo, essa métrica é observada nos gráficos da figura 10, onde o Modelo *Waypoint* possui uma variação considerável na velocidade, ou seja, em curtos períodos de tempo a velocidade sofre picos e quedas frequentemente, o que causa um comportamento não realístico no movimento. No modelo MPA, a ΔV sendo apenas entre os valores 5 m/s e 7,07 m/s, faz com que não ocorram picos e quedas. Já no Modelo A, como era esperado, a variação da velocidade é suave, até mesmo porque, o modelo suporta os mesmos valores de velocidade do MPA e o valor zero, que representa as paradas no movimento do NM.

Na figura 11, é descrito o comportamento da ΔV dos NMs no Modelo *Waypoint*. No gráfico (a) dessa figura, é mostrado o número de ocorrências de paradas abruptas, que são altas desacelerações no movimento do NM. No gráfico (b) as acelerações bruscas mostram-se semelhantes as paradas abruptas e no gráfico (c) o número total de variações na velocidade maiores que 50% da velocidade máxima. Verifica-se que quase todas as variações na velocidade foram as próprias acelerações e desacelerações bruscas, mostrando assim o comportamento não realístico desse modelo.

5. Conclusões e Trabalhos Futuros

A diversidade de cenários onde se usa uma rede *ad hoc* é muito grande, com isso, de-

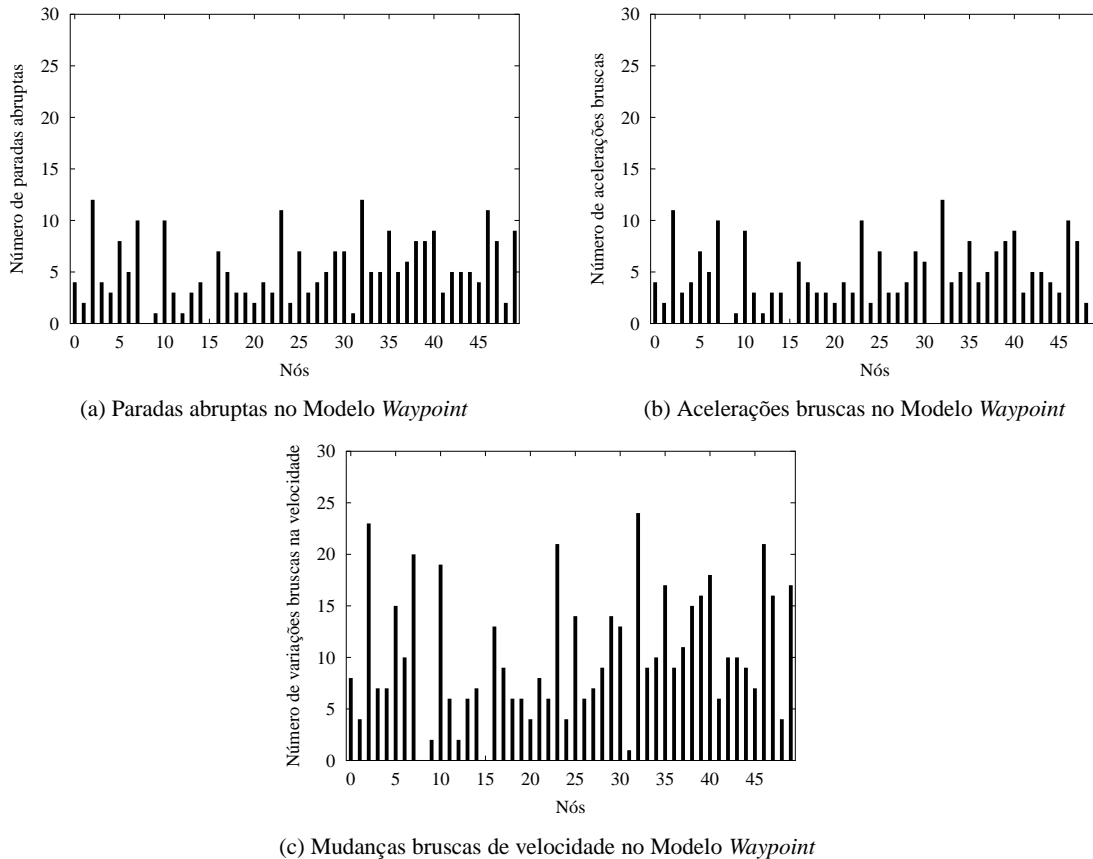


Figura 11: Variação brusca da velocidade $\geq 50\%$.

envolver um modelo de mobilidade que represente todos esses cenários, não é uma tarefa fácil, até mesmo porque, não se tem o padrão de movimentação dos usuários desses cenários. Como foi descrito na seção 2, existem vários modelos de mobilidade que buscam essa representação do movimento, os quais, são usados para avaliação de desempenho de aplicações e sistemas de comunicação em redes *ad hoc*, principalmente em algoritmos e protocolos de roteamento para essas redes. Entretanto, características desses modelos restringe-os à comportamentos de movimentação específicos ou simplesmente não representam a realidade. Com isso, deve-se ter critérios na escolha do modelo de mobilidade, senão pode-se ter uma avaliação dos sistemas não condizente com a realidade, como é mostrado em [4] e [5]. Assim sendo, se faz necessário o desenvolvimento de novos modelos de mobilidade.

Dentro desse contexto, foram propostos um conjunto de modelos na seção 3. Esses modelos são baseados em Processos Markovianos, os quais, são apropriados para modelar a movimentação de um NM de forma independente em regiões não uniformes. Eles permitem movimentos na mesma direção, em direções adjacentes, mudanças de velocidade e intervalos de pausa no movimento. Além disso, eles evitam mudanças bruscas de direção e paradas abruptas no movimento. Buscando-se assim, representar um comportamento mais realístico, do movimento dos NMs, em regiões urbanas e rodovias, que o Modelo MPA e principalmente o Modelo *Waypoint*. Os resultados obtidos através de simulação verificaram as características modeladas analiticamente e citadas acima. Mostrando assim que, em certos casos, os modelos propostos mostram-se mais adequados que os modelos *Waypoint* e o MPA.

Como trabalhos futuros, pretende-se avaliar o comportamento de movimentação dos NMs através de eventos contínuos para que se verifique a existência de ocorrências atípicas nos mes-

mos. Sendo assim, deseja-se usar cadeias de Markov com o parâmetro tempo contínuo. Por fim, pretende-se aplicar os modelos propostos nos algoritmos de roteamento AODV[7], DSDV[7] e DSR[14], avaliando o impacto causado no funcionamento dos mesmos.

Referências

- [1] C. Chiang, *Wireless Networks Multicasting*. PhD thesis, Department of Computer Science, University of California, Los Angeles, USA, 1998.
- [2] S. Corson and J. Marker, “Mobile Ad hoc Networking (MANET),” *RFC 2501*, jan 1999.
- [3] C. M. Cordeiro and D. P. Agrawal, “Mobile Ad hoc Networking,” *OBR Research Center for Distributed and Mobile Computing, ECECS*, 2002.
- [4] V. Davies, “Evaluating Mobility Models within an Ad hoc Network,” Master’s thesis, Colorado School of Mines Los Angeles, USA, 2000.
- [5] G. P. X. Hong, M. Gerla and C. Chiang, “A Group Mobility Model for Ad hoc Wireless Networks,” in *Proc. of the ACM International Workshop on Modeling and Simulation of Wireless and Mobile Systems (MSWiM)*, aug 1999.
- [6] R. S. K. Dantu, S. Kapadia and A. Helmy, “Modeling of Mobility-Induced Losses in MANETs (MILMAN),” *ACM SIGCOMM Computer Communications Review*, vol. 32, pp. 30–30, jul 2002.
- [7] J. Y. S. R. Das, R. Castaneda and R. Sengupta, “Comparative Performance Evaluation of Routing Protocols for Mobile, Ad hoc Networks,” in *7th International Conference on Computer Communications and Networks (IC3N)*, pp. 153–161, oct 1998.
- [8] K. H. Wang and B. Li, “Group Mobility and Partition Prediction in Wireless Ad-hoc Networks,” in *Proceedings of the IEEE International Conference on Communications 2002*, (New York City, NY, USA), apr 2002.
- [9] K. H. Wang and B. Li, “Efficient and Guaranteed Service Coverage in Partitionable Mobile Ad-hoc Networks,” in *Proceedings of IEEE INFOCOM’02*, 2002.
- [10] M. M. Zonoozi and P. Dassanayake, “User Mobility Modeling and Characterization of Mobility Patterns,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 15, sep 1997.
- [11] G. Pei, *Scalable Routing Strategies for Large Ad hoc Wireless Networks*. PhD thesis, Department of Computer Science, University of California, Los Angeles, USA, 2000.
- [12] V. R. S. S. Basagni, I. Chlamtac and B. A. Woodward, “A distance Routing Effect Algorithm for Mobility (DREAM),” in *ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking (MOBICOM 98)*, pp. 76–84, 1998.
- [13] Y. B. Ko and N. H. Vaidya, “Location-Aided Routing (LAR) in Mobile Ad hoc Networks,” in *ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking (MOBICOM 98)*, pp. 66–78, 1998.
- [14] D. B. Johnson and D. A. Maltz, “Dynamic Source Routing in Ad hoc Wireless Networks,” *Mobile Computing*, 1996.
- [15] L. Kleinrock, *Queueing Systems*, vol. I. New York, USA: John Wiley & Sons, 1975.
- [16] L. Qiming, “The Scenario Generator: a tool to generate MANET mobility scenarios for NS-2.” <http://www.comp.nus.edu.sg/liqm/scengen/>. Visitado em 10/05/2002.
- [17] K. Fall and K. Varadhan, *The NSManual*. The VINT Project, jan 2002.