

Estabilizando o Modelo de Mobilidade *Random Waypoint* através da Função BETA(2,1) para Escolha da Velocidade dos Nós em Redes *Ad Hoc* sem Fio

Rogério T. Silva
Depto. de Sistemas e Computação
Universidade de Pernambuco
Recife, PE 50720-001, Brasil
E-mail: rts2@dsc.upe.br

Alisson S. L. Pontes
Instituto de Computação
Universidade Estadual de Campinas
Campinas, SP 13083-970, Brasil
E-mail: alissonslp@lrc.ic.unicamp.br

Renato M. de Moraes
Depto. de Engenharia Elétrica
Universidade de Brasília
Brasília, DF 70910-900, Brasil
E-mail: renatomdm@unb.br

Abstract – It was demonstrated that the instantaneous average node speed in the Random Waypoint (RWP) mobility model goes to zero and it does not reach the steady state causing inaccuracy in simulations and validations of communication protocols for mobile ad hoc networks (MANETs). This paper proposes two modified versions of the RWP model which utilizes the BETA probability density function to choose the node speed. This work demonstrates analytically and by simulations that the proposed modifications allow the instantaneous average node speed to attain steady state which stabilizes other important network metrics like overhead and number of discarded packets. Furthermore, the instantaneous average speed reached equals $V_{Max}/2$ which was the commonly supposed value attained by the original RWP model when $V_{Min} = 0$.

Keywords — Ad hoc networks, mobility models, Random Waypoint.

Resumo – Foi demonstrado que a velocidade média instantânea dos nós no modelo de mobilidade *Random Waypoint* (RWP) tende a zero, não atingindo regime estacionário nas simulações e validações de protocolos de comunicação para redes *ad hoc* móveis (MANETs). Este artigo propõe duas versões modificadas do RWP que utilizam a função BETA como função densidade de probabilidade para escolha da velocidade dos nós da rede. Este trabalho demonstra analiticamente e por simulação que as mudanças propostas permitem que velocidade média instantânea atinja regime estacionário o que estabiliza como consequência outras importantes medidas de desempenho como número de pacotes de controle (*overhead*) e a quantidade de pacotes descartados. Além disto, a velocidade média instantânea atingida é igual a $V_{Max}/2$ que era o valor que supostamente se esperava alcançar para o modelo de mobilidade RWP original quando $V_{Min} = 0$.

Palavras-Chave — Redes *ad hoc*, modelos de mobilidade, Random Waypoint.

I. INTRODUÇÃO

O uso de dispositivos de comunicações móveis tem tornado cada vez mais comum a utilização de redes sem fio. Dentre estas redes destacam-se as redes *ad hoc* sem fio que têm como principais características o fato de serem genéricas e se organizarem de forma autônoma, além de funcionarem sem

uma determinada infra-estrutura física. Elas não possuem controle, coordenação e acesso centralizados, sendo estas tarefas distribuídas entre os próprios nós da rede os quais podem ser fixos ou móveis. Conseqüentemente, estas redes são extremamente versáteis e apresentam um enorme potencial de serem utilizadas no futuro. Como exemplos de aplicações, destacam-se o uso para monitoramento ambiental, em eventos catastróficos, em campos de batalha, monitoramento de segurança, etc. [1].

As redes *ad hoc* sem fio devem ser projetadas considerando-se protocolos de comunicação que utilizem poucos recursos computacionais e energia, devido a falta de infra-estrutura [2]. Além disto, estes protocolos devem ser testados sob condições que procurem retratar os cenários reais de uso. Desta forma, torna-se fundamental que os modelos de mobilidade para estas redes sejam o mais próximo possível da realidade. Conseqüentemente o desempenho dos protocolos depende fundamentalmente do modelo de mobilidade utilizado [3], [4], [5], [6]. Isto significa dizer que deficiências presentes nos modelos de mobilidade não devem causar forte impacto no desempenho da rede, ou seja, a comunicação entre os nós deveria prescindir de fatores inerentes ao movimento dos nós. Entretanto, tem-se observado que a dinâmica da mobilidade pode interferir bastante nos resultados e análises de desempenho dos protocolos de comunicação. Nos simuladores de rede, os resultados para serem considerados válidos devem ser obtidos sob a condição de regime estacionário, isto é, o intervalo de convergência deve ser menor que o tempo total da simulação, de forma que o transitório inicial não influencie nos resultados. Conseqüentemente, deve-se evitar modelos de mobilidade que não atingem regime estacionário.

Dentre os principais modelos de mobilidade propostos para redes *ad hoc* sem fio, o *Random Waypoint* é mencionado na literatura como um dos mais utilizados [3], [4], [5], [6], [7]. Em [7], Yoon *et al.* mostrou que o RWP não atinge regime estacionário sob certas condições de seus parâmetros. Mais especificamente, foi provado que a velocidade média instantânea dos nós na rede cai a zero ao longo do tempo, em certos casos de escolha de parâmetros e isto tem impacto direto sobre o desempenho da rede. Note-se também que autores desaparecidos deste fato utilizaram o RWP para validar

protocolos de comunicações em MANETs [3], [4], [5], [6], [12].

Em [1], Moraes *et al.* propôs o modelo de mobilidade *Random Waypoint* Modificado (RWPM) e mostrou que ao se utilizar uma distribuição BETA(2,2) para escolha da velocidade dos nós na rede, o RWPM atinge regime estacionário. Entretanto, a velocidade média instantânea dos nós na rede estabilizava em um valor relativamente baixo em relação ao que se comumente esperava no RWP original.

Este artigo propõe estabilizar o modelo de mobilidade RWP através da alteração na forma em que a velocidade dos nós é escolhida permitindo que o regime estacionário seja atingido. É feito um estudo da mobilidade e demonstra-se analiticamente e por simulação como o uso da distribuição BETA(2,1) para escolha da velocidade dos nós estabiliza o RWP para utilização em análise de desempenho de MANETs. A razão pela escolha da distribuição BETA(2,1) é que a mesma permite a velocidade média instantânea atingir regime estacionário com valor que supostamente se esperava obter no RWP original mas não acontecia devido à insuficiência de alcançar o estado estacionário conforme mostrado em [7], e pelo fato que a alteração pode também ser prontamente implementada nos simuladores de redes. A intenção deste trabalho não é produzir um modelo novo de mobilidade, porém estabilizar satisfatoriamente o largamente empregado modelo RWP e permitir a comunidade continuar utilizando-o confiavelmente para validação de protocolos de comunicação em redes *ad hoc* sem fio.

O restante deste trabalho está organizado da seguinte forma. A Seção II explica o modelo de mobilidade *Random Waypoint* original e a melhoria obtida a partir da escolha da distribuição BETA(2,2) para a velocidade dos nós. A Seção III descreve analiticamente a alteração proposta levando-se em conta que a velocidade dos nós seja especificada a partir da distribuição BETA(2,1). Nas seções IV e V são apresentados os resultados das simulações para o modelo RWP original e o modificado. Por fim, na seção VI são expostas as conclusões e sugestões de trabalhos futuros.

II. ESTABILIZAÇÃO DO MODELO DE MOBILIDADE RANDOM WAYPOINT

O modelo de mobilidade *Random Waypoint* vem sendo empregado largamente na literatura para validar protocolos de comunicações em redes *ad hoc* móveis e tem como principais características a escolha aleatória para as velocidades dos nós e o uso de tempo de pausa entre mudanças de direção na velocidade [3], [8]. A proposição a seguir determina o funcionamento do RWP, sendo importante para início da análise aqui descrita, considerando-se uma rede de área retangular com dimensões $X_{Max} \times Y_{Max}$ [3], [8].

Proposição 1 *O modelo de mobilidade RWP original [3], [8]:*
(i) *Escolhe-se aleatoriamente uma posição inicial para cada nó dada pela coordenada (x,y) onde x e y são uniformemente distribuídos no intervalo $[0, X_{Max}]$ e $[0, Y_{Max}]$, respectivamente.*
(ii) *Em seguida, cada nó seleciona um ponto de destino (x', y') uniformemente distribuído na área da rede, e uma velocidade v uniformemente distribuída no intervalo $[V_{Min}, V_{Max}]$, onde V_{Min} e V_{Max} são possíveis velocidades mínima e máxima,*

respectivamente, que um nó pode escolher, sendo $0 < V_{Min} < V_{Max}$. (iii) Antes de iniciar seu movimento o nó permanece parado por um tempo de pausa que pode ser fixo ou aleatório. (iv) Ao se expirar este tempo, o nó move-se em linha reta para o ponto (x',y') com a velocidade escolhida v . (v) Ao atingir o destino, o nó repete o procedimento a partir de (ii).

A velocidade média instantânea dos nós na rede é definida por [7]

$$\bar{v}(t) = \frac{\sum_{i=1}^N v_i(t)}{N}, \quad (1)$$

onde N é o número total de nós, e $v_i(t)$ é a velocidade do i -ésimo nó no tempo t . Espera-se que

$$\bar{v}(t) = \frac{V_{max} + V_{min}}{2} \text{ para todo } t, \quad (2)$$

entretanto, isto não é verdade [7]. Ao se utilizar um intervalo $(0, V_{Max}]$ para escolha das velocidades, os nós jamais atingirão um regime estacionário de mobilidade e isso pode levar a resultados errôneos quando este modelo é empregado para validar protocolos de comunicações em redes *ad hoc* móveis. Uma explicação intuitiva para este comportamento é observar que o RWP seleciona destino e velocidade para cada nó na rede de forma independente, de modo que cada nó manterá a velocidade escolhida até atingir o destino selecionado, repetindo-se o processo posteriormente. Neste procedimento, os nós que escolheram velocidades baixas e grandes distâncias permanecerão neste movimento por um longo tempo e, dependendo do período total da simulação, eles sequer alcançarão seus destinos. Os nós que escolherem velocidades maiores e distâncias curtas alcançarão seus destinos e logo voltarão a selecionar novos rumos e velocidades. Ao repetirem o procedimento, estes novos nós podem escolher baixas velocidades e ficarem, portanto, presos a viagens longas, tendendo a dominar a velocidade média da rede e levando a sua gradual estagnação. Nesta análise, considerou-se que a velocidade média dos nós foi selecionada uniformemente no intervalo $[V_{Min}, V_{Max}]$.

Como em [1] e [7], o tempo de pausa será considerado nulo neste artigo.

A. A Velocidade Média no Modelo RWP Estabilizado

Foi demonstrado em [1] que ao se usar uma função densidade de probabilidade para a escolha das velocidades baseada na distribuição BETA(2,2) [9], ao invés da distribuição uniforme, resulta que a velocidade média dos nós não mais decai a zero quando $V_{Min} \rightarrow 0$, mas estabiliza-se em $V_{Max}/3$ [1]. Nesta seção mostraremos que ao se utilizar uma função BETA(2,1) para escolha das velocidades dos nós, obtém-se que a velocidade média instantânea estabiliza no valor $V_{Max}/2$ quando $V_{Min} \rightarrow 0$.

Conforme observado em [7], a função densidade de probabilidade da distância R percorrida por um nó é dada por

$$f_R(r) = \begin{cases} \frac{2r}{R_{Max}^2} & 0 \leq r \leq R_{Max} \\ 0 & \text{caso contrário,} \end{cases}$$

onde R_{max} é a máxima distância que o nó pode percorrer ao escolher o próximo ponto para mover-se em sua direção em linha reta conforme a Proposição 1. O valor médio de R é obtido por [7]

$$E[R] = \int_0^{\infty} r f_R(r) dr = \frac{2}{3} R_{Max}, \quad (3)$$

que permanece o mesmo, independente da função densidade de probabilidade utilizada para a escolha da velocidade dos nós.

Partindo-se destas considerações, a função densidade de probabilidade para a variável aleatória S do tempo de viagem do nó para o RWP original é dada por [7]:

$$f_S(s) = \begin{cases} \frac{2s}{3R_{Max}^2} (V_{Max}^2 + V_{Min}^2 + V_{Max}V_{Min}) & 0 \leq s \leq \frac{R_{Max}}{V_{Max}} \\ \frac{2R_{Max}}{3(V_{Max}-V_{Min})s^2} - \frac{2sV_{Min}^3}{3R_{Max}^2(V_{Max}-V_{Min})} & \frac{R_{Max}}{V_{Max}} \leq s \leq \frac{R_{Max}}{V_{Min}} \\ 0 & s \geq \frac{R_{Max}}{V_{Min}}, \end{cases} \quad (4)$$

com o seguinte valor esperado

$$E[S] = \int_0^{\infty} s f_S(s) ds = \frac{2R_{Max}}{3(V_{Max}-V_{Min})} \ln\left(\frac{V_{Max}}{V_{Min}}\right), \quad (5)$$

A média temporal da velocidade de um nó é dada por

$$\bar{V} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T v(t) dt = \frac{E[R]}{E[S]}. \quad (6)$$

A partir das equações (3), (5) e (6), obtém-se

$$\bar{V}_{orig} = \frac{V_{Max}-V_{Min}}{\ln\left(\frac{V_{Max}}{V_{Min}}\right)}. \quad (7)$$

Observa-se que $\bar{V}_{orig} \rightarrow 0$ quando $V_{Min} \rightarrow 0$. Assim, uma possível solução para se atingir uma velocidade média não-nula, foi proposta em [7] tomando-se $V_{Min} > 0$. Para esta solução, em termos práticos, quanto mais próximo de zero for V_{Min} , mais tempo a rede levará para atingir um regime estacionário com velocidade instantânea média constante. Assim, precisa-se, na prática em simulações, usar $V_{Min} \gg 0$ para que a velocidade média instantânea atinja regime estacionário em tempo relativamente curto. Esta necessidade prática de usar $V_{Min} \gg 0$ restringe o uso deste modelo em situações onde seja preciso usar velocidades mínimas baixas.

No modelo de mobilidade RWP modificado [1], a distribuição BETA(2,2) foi utilizada para escolha da velocidade dos nós resultando para a variável aleatória S do tempo de viagem

$$f_S(s) = \begin{cases} \frac{2Ks}{R_{Max}^2(V_{Max}-V_{Min})^3} & 0 \leq s \leq \frac{R_{Max}}{V_{Max}} \\ -\frac{12R_{Max}}{5(V_{Max}-V_{Min})^3s^4} + \frac{3(V_{Max}-V_{Min})R_{Max}^2}{3R_{Max}^2(V_{Max}-V_{Min})} - \frac{4V_{Max}V_{Min}R_{Max}}{(V_{Max}-V_{Min})^3s^2} \frac{R_{Max}}{V_{Max}} & \frac{R_{Max}}{V_{Max}} \leq s \leq \frac{R_{Max}}{V_{Min}} \\ 0 & s \geq \frac{R_{Max}}{V_{Min}}, \end{cases} \quad (8)$$

onde

$$K = -\frac{6}{5}(V_{Max}^5 - V_{Min}^5) + \frac{3}{2}(V_{Max} + V_{Min})(V_{Max}^4 - V_{Min}^4) - 2V_{Max}V_{Min}(V_{Max}^3 - V_{Min}^3),$$

com o seguinte valor esperado [1]

$$E[S] = \frac{R_{Max}}{(V_{Max}-V_{Min})^2} \left[\frac{2K}{3V_{Max}^3} + \frac{9(V_{Max}^2 - V_{Min}^2)}{5} - 4V_{Max}V_{Min} \ln\left(\frac{V_{Max}}{V_{Min}}\right) + \frac{(V_{Max} - \frac{3}{5}V_{Min})(V_{Min} - \frac{4}{5}V_{Max})}{3} \right]. \quad (9)$$

Neste caso

$$\bar{V}_{Modif} = \frac{E[R]}{E[S]} = \frac{2(V_{Max}-V_{Min})^2}{\frac{2K}{3V_{Max}^3} + \frac{9(V_{Max}^2 - V_{Min}^2)}{5} - 12V_{Max}V_{Min} \ln\left(\frac{V_{Max}}{V_{Min}}\right) + V_{Min}(V_{Max} - \frac{3}{5}V_{Min}) \left(1 - \frac{V_{Min}^2}{V_{Max}^2}\right)}. \quad (10)$$

É fácil verificar que

$$\lim_{V_{Min} \rightarrow 0} \bar{V}_{Modif} = \frac{V_{Max}}{3}. \quad (11)$$

Significa dizer que ao se utilizar a distribuição BETA(2,2) para a escolha da velocidade dos nós na rede, com $V_{Min} \rightarrow 0$, então a velocidade média instantânea atinge valor estacionário diferente de zero, no caso, $V_{max}/3$. Este resultado já significa uma grande melhoria em relação ao RWP original cujo valor da velocidade média instantânea vai a zero quando $V_{Min} \rightarrow 0$, porém ainda é menor que o valor $V_{max}/2$ obtido da Eq. (2).

A idéia proposta neste trabalho é utilizar-se da distribuição BETA(2,1) para escolha da velocidade dos nós, ou seja,

$$f_V(v) = \begin{cases} \frac{2(v-V_{Min})}{(V_{Max}-V_{Min})^2} & V_{Min} \leq v \leq V_{Max} \\ 0 & \text{caso contrário.} \end{cases} \quad (12)$$

Usando esta função o seguinte teorema é obtido.

Teorema 1 A função densidade de probabilidade da variável aleatória S do tempo de viagem para o modelo de mobilidade RWP, empregando a distribuição BETA(2,1) dada pela Eq. (12) para escolha da velocidade dos nós, é dada por

$$f_S(s) = \begin{cases} \frac{1}{(V_{Max}-V_{Min})^2} \left(\frac{V_{Max}^2}{R_{Max}^2} - \frac{4V_{Max}V_{Min}}{3R_{Max}^2} + \frac{V_{Min}^2}{3R_{Max}^2} \right) s & 0 \leq s \leq \frac{R_{Max}}{V_{Max}} \\ \frac{1}{(V_{Max}-V_{Min})^2} \left[\left(\frac{V_{Max}^2}{R_{Max}^2} \right) \frac{1}{s^3} - \left(\frac{4V_{Min}R_{Max}}{3} \right) \frac{1}{s^2} + \left(\frac{V_{Min}^2}{3R_{Max}^2} \right) s \right] & \frac{R_{Max}}{V_{Max}} \leq s \leq \frac{R_{Max}}{V_{Min}} \\ 0 & \text{caso contrário,} \end{cases} \quad (13)$$

com valor esperado dado por

$$E[S] = V_{Max} - \frac{4V_{Min}}{3} + \frac{V_{Min}^2}{3V_{Max}^2} + 3(V_{Max} - V_{Min}) - 4V_{Min} \ln\left(\frac{V_{Max}}{V_{Min}}\right) + \frac{V_{Min}}{3} - \frac{V_{Min}^2}{3V_{Max}^2}. \quad (14)$$

Prova: Ver Apêndice.

A partir das Eqs. (3), (6) e (14) obtém-se o valor da média temporal da velocidade de um nó, quando se usa a função densidade de probabilidade BETA (2,1) no modelo RWP, dada por

$$\bar{V}_{Modif} = \frac{E[R]}{E[S]} = \frac{2(V_{Max}-V_{Min})}{V_{Max} - \frac{4V_{Min}}{3} + \frac{V_{Min}^2}{3V_{Max}^2} + 3(V_{Max}-V_{Min}) - 4V_{Min} \ln\left(\frac{V_{Max}}{V_{Min}}\right) + \frac{V_{Min}}{3} - \frac{V_{Min}^2}{3V_{Max}^2}}. \quad (15)$$

Isto significa que o modelo de mobilidade RWP também atinge regime estacionário com velocidade média temporal diferente de zero, dada pela Eq. (15), quando a velocidade dos nós é selecionada a partir da distribuição BETA(2,1) dada pela Eq. (12). Tomando-se o limite quando $V_{Min} \rightarrow 0$ obtém-se que

$$\lim_{V_{min} \rightarrow 0} \bar{V}_{Modif} = \frac{V_{Max}}{2}. \quad (16)$$

Este resultado é igual ao que se esperava originalmente para a velocidade média instantânea dos nós para $V_{Min} \rightarrow 0$, quando o modelo RWP foi proposto (ver Eq. (2)).

Importa ressaltar que a modificação no modelo de mobilidade RWP pode ser prontamente realizada nos simuladores de rede, pois a distribuição BETA(2,1) está disponível em várias linguagens de programação.

IV. SIMULAÇÕES EM C++

Foram realizadas algumas simulações em C++ [13] para comparação da média temporal da velocidade. Foram empregados cenários de simulação e medidas de desempenho análogos aos trabalhos relacionados anteriormente [8], a saber uma rede com dimensões 1500m x 500m utilizando 50 nós empregando os modelos de mobilidade RWP original e modificados e o resultado comparativo está ilustrado na Fig. 1, onde foram realizadas a média de 30 diferentes cenários de simulação sendo a média exibida a cada 100 segundos num total de 2000 segundos de simulação. Observa-se que o modelo RWP original apresenta decaimento gradual da velocidade média instantânea conforme observado em [7], e que o modelo RWP empregando a distribuição BETA(2,2) atinge regime estacionário com velocidade estabilizada num valor próximo a $V_{max}/3$ conforme indicado na Eq. (11) [1]. Entretanto, observa-se que no modelo RWP usando distribuição de probabilidade BETA(2,1), além de atingir regime estacionário, o valor da velocidade média instantânea estabiliza-se em $V_{max}/2$ conforme previsto pelo modelo na Eq. (16).

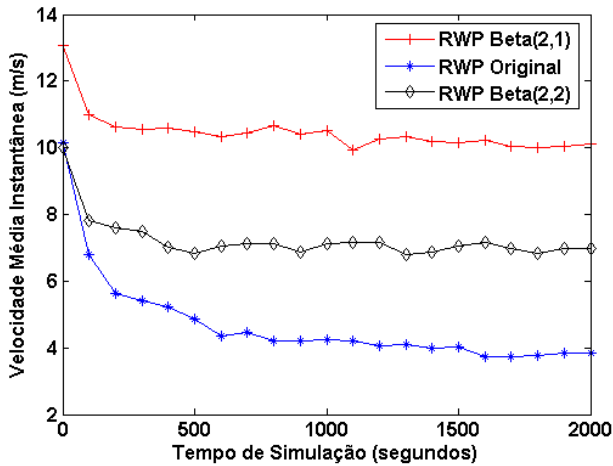


Fig. 1. Velocidade instantânea em função do tempo para simulações em C++ empregando os três modelos de mobilidade para fins de comparação, com intervalo de velocidade (0,20) m/s.

A Tabela I apresenta valores para a média temporal da velocidade $\bar{V}_{simBETA(2,1)}$ no modelo RWP empregando a distribuição BETA(2,1) obtidos a partir da simulação C++ onde os primeiros 500 segundos foram desprezados para eliminar o transitório. Também são mostrados os valores das médias temporais dos modelos analíticos oriundos das Eqs. (2), (7), (10) e (15). Observamos concordância entre os valores

simulados $\bar{V}_{simBETA(2,1)}$ e os analíticos \bar{V}_{Modif} para BETA(2,1), como também nota-se que estes valores são os mais próximos de \bar{V}_{inic} do que o RWP original e o modificado empregando a distribuição BETA(2,2), onde $\bar{V}_{inic} = (V_{max} + V_{min})/2$.

TABELA I

Velocidades médias para alguns intervalos de velocidades (em m/s).

Intervalo de velocidade	\bar{V}_{inic}	\bar{V}_{Orig}	\bar{V}_{Modif} BETA(2,2)	\bar{V}_{Modif} BETA(2,1)	\bar{V}_{Sim} BETA(2,1)
(0,20]	10	0	6,66	10	10,36
[1,19]	10	6,11	7,83	10,76	10,8
[2,18]	10	7,28	8,43	11,03	11,07
[3,17]	10	8,07	8,87	11,14	11,1
[4,16]	10	8,65	9,20	11,15	11,22
[5,15]	10	9,10	9,46	11,09	11,09
[6,14]	10	9,44	9,66	10,97	10,97
[7,13]	10	9,69	9,81	10,79	10,81
[8,12]	10	9,86	9,91	10,57	10,57
[9,11]	10	9,96	9,98	10,31	10,31
[1,21]	11	6,56	8,54	11,79	11,84
[2,22]	12	8,34	9,91	13,15	13,2
[3,23]	13	9,81	11,16	14,39	14,42
[4,24]	14	11,16	12,34	15,58	15,63
[5,25]	15	12,42	13,49	16,73	16,79
[6,26]	16	13,63	14,61	17,85	17,88
[7,27]	17	14,81	15,71	18,95	18,98
[8,28]	18	15,96	16,79	20,04	20,11
[9,29]	19	17,09	17,87	21,12	21,14
[10,30]	20	18,20	18,93	22,18	22,22

V. SIMULAÇÕES NO NS-2

A fim de verificar a importância de se utilizar um modelo de mobilidade estabilizado em simulações e validações de protocolos de comunicação em redes *ad hoc*, foram realizadas simulações no *network simulator 2* (ns-2) [14] para investigar o comportamento de medidas de desempenho de protocolos de comunicação, levando em conta o uso das mesmas bibliotecas das simulações em C++ para geração de números aleatórios. Análogo a Yoon *et al.* [7], no ambiente de simulação usou-se 50 nós móveis em uma rede de área retangular de dimensões 1500m x 500m com os nós executando os modelo de mobilidade RWP aqui considerados. Foi utilizado tempo de pausa nulo já que o mesmo não interfere na análise, conforme mencionado anteriormente. Para cada conjunto de parâmetros, realizaram-se médias sobre 30 diferentes cenários, onde as velocidades dos nós foram escolhidas no intervalo (0,20) m/s de acordo com as distribuições uniforme para o RWP original, a distribuição BETA(2,2) e a BETA(2,1) para os dois casos de RWP estabilizado. O tráfego de dados foi de taxa de bit constante (CBR) onde se empregou 30 nós fontes gerando tráfego a 4 pacotes por segundo, tendo cada pacote tamanho de 64 bytes. O alcance máximo de transmissão de dados para cada

nó (R_{Max}) foi fixado em 250m e a taxa de transmissão da camada física foi estabelecida em 2Mbps.

Para roteamento foi utilizado o protocolo *Ad Hoc On-Demand Distance Vector (AODV)* [11]. A intenção não é produzir uma análise detalhada de desempenho, porém deseja-se ilustrar como a proposta de alteração no modelo RWP estabiliza as medidas investigadas, no caso número de pacotes de controle e número de pacotes descartados, que têm impacto na sobrecarga (*overhead*) e na vazão (*throughput*), respectivamente, nas aplicações que utilizam redes *ad hoc* sem fio.

A. Número de Pacotes de Controle de Roteamento

Esta medida considera todos os pacotes de controle utilizados pelo AODV na descoberta e manutenção de rotas. Cada salto realizado pelo pacote é levado em consideração, de modo que um pacote que percorre cinco nós contabilizará cinco pacotes de controle [7], [11]. A Fig. 2 ilustra o resultado obtido com a simulação.

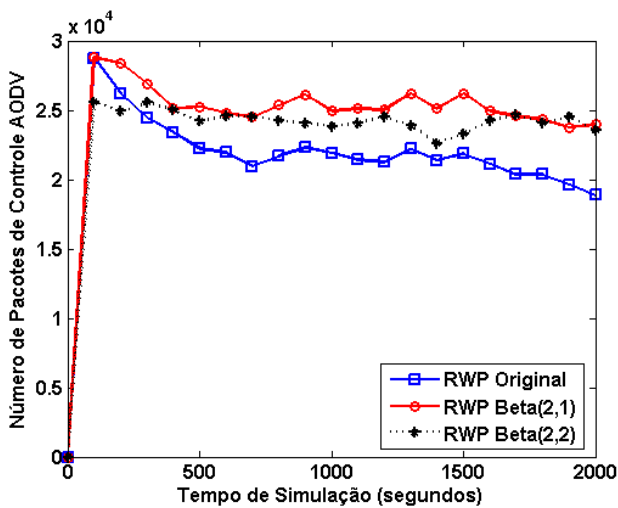


Fig. 2. Número de pacotes de controle de roteamento em função do tempo.

Pode-se observar que a medida que o tempo passa a rede tende a se tornar mais estática no modelo RWP original, visto que a velocidade média instantânea decai a zero, o que faz com que haja uma menor requisição de pacotes de controle para estabelecer e manter as rotas no AODV levando à redução gradual do número de pacotes de controles. Por outro lado, nos casos dos modelos RWP estabilizados, nota-se a estabilização nas medidas quando a velocidade média instantânea atinge o regime estacionário.

B. Pacotes de Dados Descartados

Esta medida descreve o número de pacotes perdidos que ocorrem na rede ao se enviar pacotes de dados. Os motivos que ocasionam estas perdas podem ser erros de transmissão, colisões, etc., e podem acontecer em qualquer camada [7], [11].

A Fig. 3 mostra como o número de pacotes descartados permanece caindo no modelo RWP original e sua estabilização nos modelos RWP modificados.

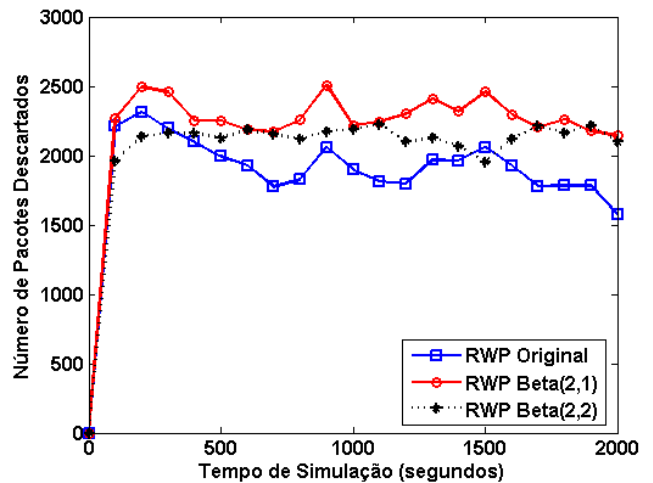


Fig. 3. Número de pacotes de dados descartados em função do tempo.

Observa-se, portanto, que as medidas de desempenho estão diretamente relacionadas ao comportamento da velocidade média instantânea, e utilizar o modelo de mobilidade *Random Waypoint* original pode resultar avaliações errôneas quando protocolos de comunicação precisam ser avaliados em redes *ad hoc*.

VI. CONCLUSÕES

Este trabalho avaliou uma modificação para o modelo de mobilidade *Random Waypoint* propondo utilizar uma função densidade de probabilidade BETA(2,1) para escolha das velocidades dos nós em uma rede *ad hoc*, ao invés de empregar a distribuição uniforme que resultava no decaimento gradual da velocidade média instantânea dos nós quando o limite inferior de escolha da velocidade era ajustado para zero, isto é, $V_{Min} = 0$, consequentemente ocasionando o decaimento de outras medidas de desempenho de protocolos de comunicação, interferindo na avaliação destes protocolos.

Observou-se que, no caso do RWP empregando a distribuição BETA(2,1), a velocidade média instantânea dos nós na rede não só atingia estabilização, como também o valor médio obtido iguala-se a $V_{max}/2$ que era supostamente o valor da velocidade média instantânea que se achava acontecer no RWP original, e maior que valor $V_{max}/3$ atingido pelo modelo RWP modificado que emprega a distribuição BETA(2,2) proposta anteriormente em [7].

Verificou-se ainda, através de simulações no ns-2, que o modelo RWP modificado empregando a distribuição BETA(2,1) estabiliza as medidas de desempenho do número de pacotes de controle e de pacotes descartados.

Ressalta-se também que a mudança proposta pode ser prontamente implementada nos simuladores de redes existentes a partir de modificações referentes às chamadas de função, e pelo fato de que a distribuição BETA(2,1) está disponível em diversas linguagens de programação.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi financiado em parte pela Escola Politécnica de Pernambuco, pela Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco (FACEPE), e pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Brasil.

APÊNDICE

A. Prova do Teorema 1

Para calcular a função densidade de probabilidade da variável aleatória S do tempo de viagem do nó, obtém-se primeiramente sua distribuição de probabilidade $P(S \leq s)$, observando-se os três casos possíveis de valores que S pode assumir [1]. Considerou-se ainda que as variáveis aleatórias R e V são independentes, conforme descrito em [1]. Sendo assim, obteremos os resultados a seguir.

(i) No intervalo $s \geq \frac{R_{Max}}{V_{Min}}$, tem-se que

$$P(S \leq s) = \int_{V_{Min}}^{V_{Max}} \int_0^{R_{Max}} f_{R,V}(r, v) dr dv = 1.$$

(ii) No intervalo $\frac{R_{Max}}{V_{Max}} \leq s \leq \frac{R_{Max}}{V_{Min}}$

$$P(S \leq s) = \underbrace{\int_{\frac{R_{Max}}{s}}^{\frac{R_{Max}}{V_{Min}}} \int_0^{vs} f_{R,V}(r, v) dr dv}_{I_1} + \underbrace{\int_{\frac{R_{Max}}{s}}^{R_{Max}} \int_0^{R_{Max}} f_{R,V}(r, v) dr dv}_{I_2}$$

Resolvendo I_1 , obtém-se

$$I_1 = \frac{s^2}{R_{Max}^2} \int_{\frac{R_{Max}}{s}}^{\frac{R_{Max}}{V_{Min}}} v^2 f_V(v) dv = \frac{s^2}{R_{Max}^2} \int_{\frac{R_{Max}}{s}}^{\frac{R_{Max}}{V_{Min}}} \frac{2v^2(v - V_{Min})}{(V_{Max} - V_{Min})} dv.$$

Logo,

$$I_1 = \frac{2}{R_{Max}^2 (V_{Max} - V_{Min})^2} \left(\frac{R_{Max}^4}{4s^2} - \frac{V_{Min} \cdot R_{Max}^3}{3s} + \frac{V_{Min}^4 \cdot s^2}{12} \right).$$

Da mesma forma, I_2 será dado por

$$I_2 = \int_{\frac{R_{Max}}{s}}^{V_{Max}} f_V(v) dv = \frac{2}{(V_{Max} - V_{Min})^2} \left(\frac{R_{Max}^2}{4s^2} - \frac{V_{Min} \cdot R_{Max}}{3s} + \frac{V_{Min}^4 \cdot s^2}{12R_{Max}^2} \right).$$

Somando I_1 e I_2 chega-se a

$$P(S \leq s) = \frac{2}{(V_{Max} - V_{Min})^2} \left(\frac{V_{Max}^2}{2} - V_{Min} V_{Max} - \frac{R_{Max}^2}{4s^2} + \frac{2V_{Min} R_{Max}}{3s} + \frac{V_{Min}^4 s^2}{12R_{Max}^2} \right).$$

(iii) Para o caso em que $0 \leq s \leq \frac{R_{Max}}{V_{Max}}$, tem-se

$$P(S \leq s) = \frac{s^2}{R_{Max}^2} \int_{V_{Min}}^{V_{Max}} v^2 f_V(v) dv = \frac{2s^2}{R_{Max}^2 (V_{Max} - V_{Min})^2} \int_{V_{Min}}^{V_{Max}} (v^3 - v^2 V_{Min}) dv,$$

$$P(S \leq s) = \frac{2s^2}{2R_{Max}^2 (V_{Max} - V_{Min})^2} \left(\frac{V_{Max}^4}{4} - \frac{V_{Max}^3 V_{Min}}{3} + \frac{V_{Min}^4}{12} \right).$$

Tomando-se a derivada de $P(S \leq s)$ em relação a s será obtida a função densidade de probabilidade da variável aleatória S conforme mostrado abaixo

$$f_s(s) = \frac{dP(S \leq s)}{ds} = \begin{cases} \frac{1}{(V_{Max} - V_{Min})^2} \left(\frac{V_{Max}^4}{R_{Max}^2} - \frac{4V_{Max}^3 V_{Min}}{3R_{Max}^2} + \frac{V_{Min}^4}{3R_{Max}^2} \right) s, & 0 \leq s \leq \frac{R_{Max}}{V_{Max}} \\ \frac{1}{(V_{Max} - V_{Min})^2} \left[(R_{Max}^2) \frac{1}{s^3} - \left(\frac{4V_{Min} R_{Max}}{3} \right) \frac{1}{s^2} + \left(\frac{V_{Min}^4}{3R_{Max}^2} \right) s \right], & \frac{R_{Max}}{V_{Max}} \leq s \leq \frac{R_{Max}}{V_{Min}} \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

Assim, $E[S]$ é dado por

$$E[S] = \int_0^{\infty} s f(s) ds$$

$$E[S] = V_{Max} - \frac{4V_{Min}}{3} + \frac{V_{Min}^4}{3V_{Max}^3} + 3(V_{Max} - V_{Min}) - 4V_{Min} \ln \left(\frac{V_{Max}}{V_{Min}} \right) + \frac{V_{Min}}{3} - \frac{V_{Min}^4}{3V_{Max}^3}.$$

C. Q. D.

REFERÊNCIAS

- [1] R. M. Moraes, F. P. Araújo e A. S. L. Pontes, "Uma Proposta para Estabilizar o Modelo de Mobilidade Random Waypoint em Redes Ad Hoc sem Fio", Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos (SBRC), 2009, Recife-PE.
- [2] C. S. R. Murthy e B. S. Manoj, *Ad hoc Wireless Networks: Architectures and Protocols*. Pearson.
- [3] T. Camp e J. Boleng, V. Davies, "Mobility Models for Ad hoc Networks Simulations". *Wireless Communications and Mobile Computing (WCMC): Special issue on Mobile Ad Hoc Networking: Research, Trends and Applications*, vol. 2, no. 5, p.483-502, 2002.
- [4] D. D. Perkins, H. D. Hugues e C. B. Owen, "Factors Affecting the Performance of Ad Hoc Networks", *Proc. of IEEE International Conference on Communications (ICC)*, New York, NY, USA, 2002.
- [5] C. Bettstter, "Smooth Is Better Than Sharp: a Random Mobility Model for Simulation of Wireless Network". *Proc. of ACM International Workshop on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems (MSWiN)*, Rome, Italy, 2001.
- [6] E. M. Royer, P. M. Melliar-Smith e L. E. Moser, "An Analysis of the Optimum Node Density for Ad hoc Mobile Networks". *Proc. of IEEE International Conference on Communications (ICC)*, Helsink Finland, 2001.
- [7] J. Yoon, M. Liu e B. Noble, "Random Waypoint Considered Harmful"; Proceedings of IEEE Conference on Computer Communications (INFOCOM), San Francisco, CA, USA, 2003.
- [8] J. Broch, D. A. Maltz, D. B. Johnson, Y. C. Hu e J. Jetcheva, ; "A Performance Comparison of Multi-hop Wireless Ad hoc Networking Routing Protocols". *Proc. of ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking*, Dallas, TX, USA, 1998.
- [9] A. Papoulis and S. U. Pillai, *Probability, Random Variables and Stochastic Processes*. McGraw Hill, 2002.
- [10] The ns manual. [online] Disponível em <http://www.isi.edu/nsnam/ns/ns-documentation.html>. Acessado em 11 de maio de 2009.
- [11] C. E. Perkins and E. M. Royer, "Ad-hoc On-demand Distance Vector Routing". *Proc. of IEEE Workshop on Mobile Computing System and Applications*, New Orleans, LA, USA, 1999.
- [12] G. Jayakumar and G. Gopinath, "Performance comparison of two on-demand routing protocols for ad-hoc networks based on random way point mobility model," *American Journal of Applied Sciences*, vol. 5, no. 6, p.649-664.
- [13] H. Schildt, C++: *The Complete Reference*. McGraw-Hill, 2002.
- [14] <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>, último acesso em 13-09-2009.