

Uma Proposta para Estabilizar o Modelo de Mobilidade *Random Waypoint* em Redes *Ad Hoc* sem Fio

Renato M. de Moraes¹, Fagner P. de Araújo e Alisson S. L. Pontes¹

¹Departamento de Sistemas e Computação - Universidade de Pernambuco
CEP 50720-001, Recife - PE, Brasil

{renato,alisp,fpa}@dsc.upe.br

Abstract. *It has been shown recently that the instantaneous average nodal speed in the Random Waypoint (RWP) mobility model may not reach a stationary regime which can cause inaccurate results in simulations and communication protocol validations for wireless ad hoc networks. This paper presents a modification in the RWP model and demonstrates analytically and by simulations that the proposed idea stabilizes the instantaneous average nodal speed in the network whichever is the chosen set of parameters. The proposed change in the RWP model can be easily incorporated in the current simulators by doing a simple alteration in the function called to choose the velocity of the nodes. Another advantage is that the average speed obtained due to the modifications is higher than that attained in the original RWP model.*

Resumo. *Foi mostrado recentemente que a velocidade média instantânea dos nós no modelo de mobilidade Random Waypoint (RWP) pode não atingir regime estacionário e com isso gerar resultados imprecisos nas simulações e validações de protocolos de comunicação para redes ad hoc sem fio. Este artigo apresenta uma alteração para o modelo RWP e demonstra analiticamente e por simulação que a idéia proposta estabiliza a velocidade média instantânea dos nós na rede para qualquer conjunto de parâmetros escolhido e pode ser facilmente incorporada nos atuais simuladores através de uma simples mudança na chamada de função para a escolha das velocidades dos nós. Outra vantagem da proposta é que a velocidade média alcançada devida a modificação é maior que a do modelo RWP original.*

1. Introdução

Redes *ad hoc* sem fio não possuem estações rádio-base (ERBs ou pontos de acesso) para coordenação e controle, e toda a tarefa de acesso ao canal de comunicação é distribuída entre os próprios nós (ou usuários) [Tonguz and Ferrari 2006], [Murthy and Manoj 2004]. Ou seja, não existe uma infra-estrutura de rede, enquanto que os nós podem ser fixos ou móveis. Resulta assim que estas redes são extremamente versáteis e têm um enorme potencial de serem as redes utilizadas no futuro. Por exemplo, em situações onde nenhuma infra-estrutura fixa está disponível, tais como monitoramento ambiental, eventos catastróficos, ou em campos de batalhas, as redes *ad hoc* sem fio são opções mais apropriadas que as tradicionais redes locais fixas (LANs) [Tanenbaum 2002] e vem atraindo fortemente o interesse da comunidade da área de redes e comunicações.

As redes *ad hoc* devem possuir protocolos de comunicação descentralizados e que fazem pouco uso de recursos computacionais e energia dada a falta de infra-estrutura [Murthy and Manoj 2004]. Estes protocolos devem ser testados sob condições que procurem retratar os mais diversos cenários práticos que um usuário deste sistema pode encontrar. Neste contexto, o efeito da mobilidade em redes *ad hoc* tem sido estudado

por diversos autores interessados em investigar os sistemas e protocolos de comunicação sob condições de uso que reproduzam as situações de usuários em movimento que utilizam a rede [Camp et al. 2002], [Perkins et al. 2002], [Bettstetter 2001], [Royer et al. 2001], [Yoon et al. 2003]. Como consequência, o desempenho destes protocolos depende fortemente do modelo de mobilidade empregado e suas características. A dinâmica da mobilidade pode interferir bastante nos resultados de análise de desempenho dos protocolos. Por exemplo, os resultados de qualquer simulação da rede, para serem considerados válidos, precisam ser obtidos sob regime estacionário, isto é, o tempo de convergência necessita ser menor que o intervalo total da simulação, o que implica que as variações iniciais não podem ser consideradas. Dessa forma, modelos de mobilidade que jamais atingem um regime estacionário devem ser evitados.

Dentre os vários modelos de mobilidade utilizados na literatura e nos simuladores para redes *ad hoc*, o *Random Waypoint* (RWP) é certamente o mais empregado [Camp et al. 2002], [Perkins et al. 2002], [Yoon et al. 2003], [Broch et al. 1998], [Chiang and Gerla 1998], [Perkins et al. 2001], [Jayakumar and Gopinath 2008], [Garcia-Luna-Aceves and Spohn 1999]. Suas principais características são a escolha aleatória da posição e velocidade e o tempo de pausa entre os intervalos de mudança de direção do movimento em cada nó. Em [Yoon et al. 2003], foi mostrado que o RWP sofre do problema de não atingir regime estacionário sob certas condições de seus parâmetros. Mais especificamente, eles provaram 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. Mais preocupante é que vários autores têm testados diversos protocolos de comunicação sob estas condições [Perkins et al. 2002], [Broch et al. 1998], [Chiang and Gerla 1998], [Perkins et al. 2001], [Jayakumar and Gopinath 2008], o que pode levar a resultados imprecisos ou até mesmo inválidos.

O presente artigo propõe uma alteração na forma de escolha das velocidades dos nós que permite ao RWP sempre atingir regime estacionário, estabilizando este modelo para uso nos simuladores de redes *ad hoc*. Um estudo analítico da mobilidade foi realizado onde se demonstra como o regime estacionário é sempre alcançado com a proposta de modificação, e são mostrados resultados de simulações que corroboram a análise. A alteração pode ser facilmente incorporada nos simuladores de redes atuais bastando para isso apenas a troca de uma chamada de função.

O restante deste artigo está organizado da seguinte forma. A Seção 2 faz uma revisão do modelo de mobilidade RWP ressaltando sua deficiência para atingir um regime estacionário caso o parâmetro da velocidade não seja apropriadamente escolhido. Na Seção 3 é apresentada uma modificação para o RWP onde se mostra que se a função de escolha das velocidades dos nós for baseada na distribuição $BETA(2, 2)$ [Papoulis and Pillai 2002], então a velocidade média instantânea dos nós na rede não sofre do problema de estabilização independente dos parâmetros utilizados. A Seção 4 traz os resultados para simulações no ambiente JiST/SWANS [JiST/SWANS 2008] do modelo RWP original e o modificado onde seus desempenhos são comparados. Finalmente, a Seção 5 conclui o trabalho.

2. O Modelo de Mobilidade *Random Waypoint* Original

Um modelo de mobilidade deve tentar imitar movimentos reais de nós móveis. O modelo de mobilidade *Random Waypoint* procura aproximar-se da realidade introduzindo tempos de pausa entre as mudanças de direção e velocidade, e vem sendo empregado largamente na literatura para validar protocolos de comunicações em redes *ad hoc* móveis.

O procedimento de funcionamento do RWP é determinado pela seguinte proposição, onde se considera uma rede de área retangular com dimensões X_{max} x Y_{max} .

Proposição 1 - *O modelo de mobilidade RWP original [Camp et al. 2002], [Broch et al. 1998]: (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 as possíveis velocidades mínima e máxima, respectivamente, que um nó pode escolher, sendo $0 < V_{min} < V_{max}$.¹ (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 de destino (x', y') com a velocidade escolhida v . (v) Ao atingir o destino, o nó repete o procedimento a partir de (ii), e assim sucessivamente até o final da simulação.*

A velocidade média instantânea dos nós na rede para um dado cenário de mobilidade é definida por [Yoon et al. 2003]

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

onde N é o número total de nós, e $v_i(t)$ é a velocidade do i -ésimo nó no tempo t . Espera-se comumente que $\bar{v}(t) = \frac{V_{max}+V_{min}}{2} \quad \forall t$, entretanto isto não é verdade. Em [Yoon et al. 2003], foi mostrado que sequer um regime estacionário pode ser atingido nos casos em que $V_{min} \rightarrow 0$, ou seja, demonstrou-se que $\bar{v}(t)$ decai ao longo do tempo tal que $\lim_{t \rightarrow \infty} \bar{v}(t) = 0$. Em termos práticos, isso significa dizer que ao se utilizar um intervalo $(0, V_{max}]$ para escolha das velocidades então os nós jamais atingirão um regime estacionário de mobilidade e isso pode levar a resultados errôneos quando esse 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 aleatória e independente onde cada nó manterá a velocidade escolhida até atingir o destino selecionado e depois se repete o processo. Neste procedimento, os nós que escolheram velocidades baixas e grandes distâncias permanecerão neste movimento por um longo tempo e dependendo do período total de 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, esses novos nós podem escolher baixas velocidades e ficarem portanto presos a viagens longas e tenderão a dominar a velocidade média da rede levando a sua gradual estagnação. A Fig. 1 mostra a evolução temporal da velocidade média instantânea dos nós para intervalo de escolha $(0, 20]$ metros por segundo (m/s), com tempo de pausa nulo, numa rede de área retangular com dimensões 1500m x 500m contendo 50 nós onde os resultados foram obtidos realizando-se a média de 30 diferentes cenários de simulação realizada em C++ [Schildt 2002], sendo a média da velocidade calculada a cada segundo. Observa-se que no início, ou seja, quando $t = 0$, $\bar{v}(t) = \frac{V_{max}+V_{min}}{2} = \bar{V}_{inic}$, porém $\bar{v}(t)$ decai consistentemente ao longo do tempo. Nesta mesma figura, nota-se que ao escolher as velocidades no intervalo $[1, 19]$ m/s acontece um decaimento inicial devido ao transitório da simulação, contudo $\bar{v}(t)$ se estabiliza visto que $V_{min} = 1$ m/s.

¹Embora comumente se assuma para a velocidade distribuição uniforme no intervalo $[0, V_{max}]$, isto pode ocasionar divisão por zero nos simuladores de rede [Yoon et al. 2003].

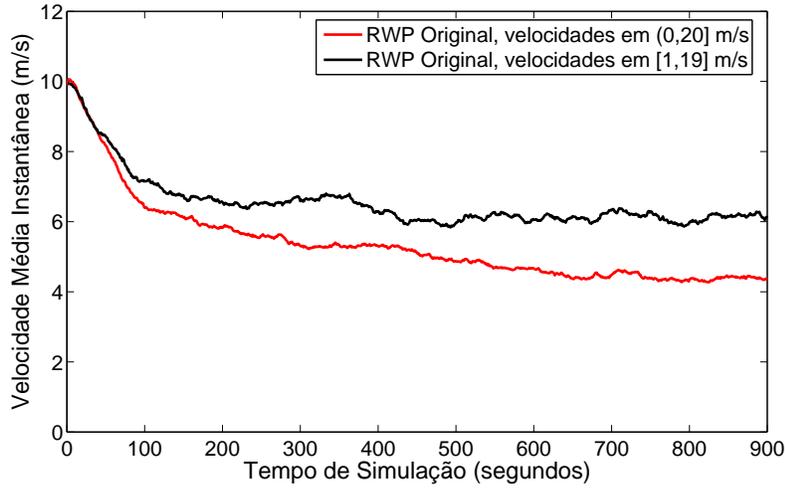


Figura 1. Velocidade média instantânea em função do tempo de simulação no modelo RWP original para intervalos de escolha de velocidades dados por $(0, 20]$ e $[1, 19]$ m/s, respectivamente, e tempo de pausa nulo.

É importante frisar que o tempo de pausa não altera as conclusões, já que o mesmo não é a causa do decaimento da velocidade, embora induza a uma maior variação no início da simulação, conforme observado em [Yoon et al. 2003]. Entretanto, essa flutuação é gradualmente reduzida com o passar do tempo não mudando a consistência do decaimento da média instantânea da velocidade. Dito isto, a fim de facilitar a análise, assumir-se-á tempo de pausa nulo neste artigo.

A condição do RWP de selecionar a velocidade uniformemente no intervalo $[V_{min}, V_{max}]$ no início de cada movimento traduz-se na seguinte função uniforme de densidade de probabilidade (ou distribuição uniforme de probabilidade) para a variável aleatória V que descreve a escolha da velocidade do nó

$$f_V(v) = \begin{cases} \frac{1}{V_{max} - V_{min}} & V_{min} \leq v \leq V_{max} \\ 0 & \text{caso contrário,} \end{cases} \quad (2)$$

onde $0 < V_{min} < V_{max}$ e média $E[V] = \int_0^\infty v f_V(v) dv = \frac{V_{max} + V_{min}}{2} = \bar{V}_{inic}$. É importante ressaltar que a distribuição acima pode ser reproduzida nos simuladores a partir da função pseudo-aleatória $RAND$ disponível em várias linguagens de programação, sendo necessária alterá-la de acordo com os valores de V_{min} e V_{max} gerando uma nova função NEW_RAND pseudo-aleatória no intervalo $[V_{min}, V_{max}]$. Por exemplo, se $RAND$ estiver definida no intervalo $[0,1]$, então se tem que

$$NEW_RAND = (V_{max} - V_{min}) \cdot RAND + V_{min}. \quad (3)$$

Por outro lado, a distância percorrida por um nó ao executar o RWP é função da sua posição atual dado que a área da rede é limitada. Porém, de forma a facilitar a análise e não alterar as principais conclusões, pode-se assumir que o nó escolhe o próximo destino até uma máxima distância R_{max} da sua posição atual. Então, a função densidade de probabilidade da distância R percorrida por um nó é dada por [Yoon et al. 2003]

$$f_R(r) = \begin{cases} \frac{2r}{R_{max}^2} & 0 \leq r \leq R_{max} \\ 0 & \text{caso contrário,} \end{cases} \quad (4)$$

tendo o seguinte valor médio

$$E[R] = \int_0^{\infty} r f_R(r) dr = \frac{2}{3} R_{max}. \quad (5)$$

Partindo das Eqs. (2) e (4), pode-se mostrar que a função densidade de probabilidade para a variável aleatória S do tempo de viagem do nó é dada por [Yoon et al. 2003]

$$f_S(s) = \begin{cases} \frac{2s}{3R_{max}^2}(V_{max}^2 + V_{min}^2 + V_{max}V_{min}) & 0 \leq s \leq \frac{R_{max}}{V_{max}} \\ \frac{2R_{max}}{3(V_{max} - V_{min})s^2} - \frac{2sV_{min}^3}{3R_{max}^2(V_{max} - V_{min})} & \frac{R_{max}}{V_{max}} \leq s \leq \frac{R_{max}}{V_{min}} \\ 0 & s \geq \frac{R_{max}}{V_{min}}, \end{cases} \quad (6)$$

com o seguinte valor esperado

$$E[S] = \int_0^{\infty} s f_S(s) ds = \frac{2R_{max}}{3(V_{max} - V_{min})} \ln \left(\frac{V_{max}}{V_{min}} \right). \quad (7)$$

Em [Yoon et al. 2003], foi mostrado que a média temporal (\bar{V}) da velocidade para um dado nó pode ser obtida a partir da sua velocidade instantânea e das equações acima, tal que

$$\bar{V} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T v(t) dt = \frac{E[R]}{E[S]}, \quad (8)$$

que pode ser tomada como a velocidade média estacionária de um nó na rede. Substituindo as Eqs. (5) e (7) na Eq. (8), resulta a seguinte relação para a média temporal da velocidade (\bar{V}_{orig}) de um nó no modelo RWP original [Yoon et al. 2003]

$$\bar{V}_{orig} = \frac{V_{max} - V_{min}}{\ln \left(\frac{V_{max}}{V_{min}} \right)}. \quad (9)$$

Das Eqs. (7) e (9), vê-se que $\bar{V}_{orig} \rightarrow 0$ à medida que $V_{min} \rightarrow 0$, visto que $E[S] \xrightarrow{V_{min} \rightarrow 0} \infty$, confirmando o resultado da simulação apresentado na Fig. 1. Dessa forma, para se atingir uma velocidade média não nula deve-se tomar $V_{min} > 0$. Em termos práticos, quanto mais próximo de zero for V_{min} , mais tempo a rede levará até atingir um regime estacionário com velocidade média constante [Yoon et al. 2003].

3. O Modelo de Mobilidade *Random Waypoint* Estabilizado

No intuito de resolver o problema da estabilização da velocidade média dos nós na rede, tal que impeça seu decaimento quando se usa o intervalo $(0, V_{max}]$, este artigo propõe uma alteração no modelo RWP original. Demonstrar-se-á que ao se tomar uma função densidade de probabilidade para a escolha das velocidades baseada na distribuição *BETA*(2, 2) [Papoulis and Pillai 2002], ao invés da distribuição uniforme, resulta que a velocidade média dos nós na rede não mais decai a zero quando $V_{min} \rightarrow 0$. Esta alteração, entretanto, não modifica drasticamente o modelo de mobilidade que continua com suas demais características e a única variação na sua implementação nos simuladores de rede é apenas uma mudança numa chamada de função.

A função densidade de probabilidade aqui proposta para escolha das velocidades dos nós no RWP está descrita no teorema a seguir.

Teorema 1 A função contínua dada por

$$f_V(v) = \begin{cases} -\frac{6}{(V_{max}-V_{min})^3} \left(v - \frac{V_{max}+V_{min}}{2}\right)^2 + \frac{3}{2(V_{max}-V_{min})} & V_{min} \leq v \leq V_{max} \\ 0 & \text{caso contrário,} \end{cases} \quad (10)$$

é uma função densidade de probabilidade para a variável aleatória V onde $0 < V_{min} < V_{max}$.

Prova: segue da Eq. (10) que: (i) $f_V(v) = 0$ se $v \notin [V_{min}, V_{max}]$; (ii) $f_V(v) \geq 0$ se $v \in [V_{min}, V_{max}]$; (iii) $\int_{-\infty}^{\infty} f_V(v)dv = 1$; (iv) $f_V(v)$ é linear por partes como também pode ser observado pela Fig. 2 que ilustra graficamente esta função. Portanto, $f_V(v)$ satisfaz aos requisitos de uma função contínua de densidade de probabilidade [Papoulis and Pillai 2002]. ■

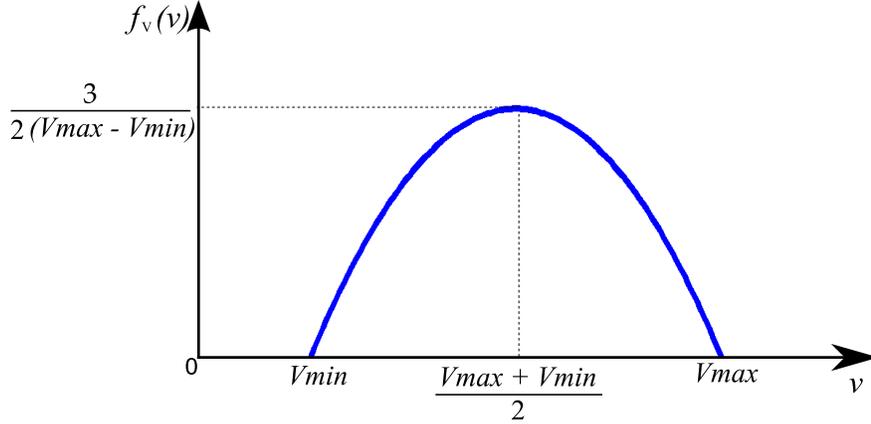


Figura 2. Gráfico da função densidade de probabilidade $f_V(v)$, descrita na Eq. (10), para escolha das velocidades dos nós no modelo RWP modificado.

Note que esta função pode ser reproduzida nos simuladores a partir da distribuição $BETA(2, 2)$ [Papoulis and Pillai 2002], a qual está definida no intervalo $[0,1]$, através da seguinte modificação designada $NEW_BETA(2, 2)$:

$$NEW_BETA(2, 2) = (V_{max} - V_{min}) \cdot BETA(2, 2) + V_{min}. \quad (11)$$

Outro aspecto importante da distribuição dada pela Eq. (10) é que $f_V(v)$ é simétrica em relação a sua média $E[V]$ que também é igual a $\frac{V_{max}+V_{min}}{2} = \bar{V}_{inic}$, analogamente à distribuição uniforme do modelo RWP original.

Proposição 2 - O modelo RWP modificado: o modelo Random Waypoint modificado constitui-se da Proposição 1, alterando-se a escolha das velocidades dos nós baseada na função densidade de probabilidade descrita na Eq. (10), ao invés da distribuição uniforme mostrada na Eq. (2).

Teorema 2 Ao se utilizar a função densidade de probabilidade dada pela Eq. (10) para escolha das velocidades dos nós no modelo RWP, resulta que a função densidade de probabilidade para a variável aleatória S do tempo de viagem de um nó é dada por

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

onde K é a seguinte constante

$$K = -\frac{6}{5}(V_{max}^5 - V_{min}^5) + \frac{3}{2}(V_{max} + V_{min})(V_{max}^4 - V_{min}^4) - 2V_{max}V_{min}(V_{max}^3 - V_{min}^3). \quad (13)$$

Prova: Ver Apêndice.

Uma vez determinada a densidade de probabilidade da variável aleatória S do tempo de viagem, é possível obter sua média, o que resulta o seguinte corolário.

Corolário 1 *A média da variável aleatória S do tempo de viagem executado por um nó no modelo RWP, onde o nó escolhe sua velocidade de acordo com a Eq. (10), é dada por*

$$E[S] = \frac{R_{max}}{(V_{max} - V_{min})^3} \left[\frac{2K}{3V_{max}^3} + \frac{9(V_{max}^2 - V_{min}^2)}{5} - 4V_{max}V_{min} \ln\left(\frac{V_{max}}{V_{min}}\right) + \frac{(V_{max} - \frac{3}{5}V_{min})\left(V_{min} - \frac{V_{min}^4}{V_{max}^3}\right)}{3} \right]. \quad (14)$$

Prova: Ver Apêndice.

Usando agora as Eqs. (5), (8) e (14) obtém-se a seguinte relação para a média temporal da velocidade de um nó na rede no modelo RWP modificado (\bar{V}_{modif})

$$\bar{V}_{modif} = \frac{E[R]}{E[S]} = \frac{2(V_{max} - V_{min})^3}{\frac{2K}{V_{max}^3} + \frac{27}{5}(V_{max}^2 - V_{min}^2) - 12V_{max}V_{min} \ln\left(\frac{V_{max}}{V_{min}}\right) + V_{min}(V_{max} - \frac{3}{5}V_{min})\left(1 - \frac{V_{min}^3}{V_{max}^3}\right)}. \quad (15)$$

É fácil verificar que

$$\lim_{V_{min} \rightarrow 0} \bar{V}_{modif} = \frac{V_{max}}{3}, \quad (16)$$

ou seja, no modelo RWP, ao se escolher a velocidade para cada nó através da função densidade de probabilidade dada pela Eq. (10), e não a uniforme dada pela Eq. (2), resulta que a média temporal da velocidade de cada nó não decai a zero ao longo do tempo quando $V_{min} \rightarrow 0$. Em outras palavras, a proposta de alteração aqui descrita soluciona o problema do decaimento da velocidade média dos nós no modelo RWP original, e permite que a mobilidade na rede atinja um regime estacionário quando $V_{min} \rightarrow 0$. Outra grande vantagem desta idéia é que a mesma pode ser implementada através de uma fácil alteração nos simuladores, isto é, basta substituir a chamada da função *RAND*, para escolher uma velocidade, pela distribuição *BETA(2, 2)* disponível, por exemplo, na biblioteca *GSL* [GSL 2008] da linguagem de programação C e C++, ou na biblioteca *SSJ* da linguagem *JAVA* [SSJ 2008], [Horstmann and Cornell 2004].

A fim de corroborar a análise realizada, foi simulada em C++ uma rede com dimensões 1500m x 500m utilizando 50 nós empregando os modelos de mobilidade RWP original e modificado, respectivamente, e o resultado comparativo está ilustrado na Fig. 3, onde foram realizadas a média de 30 diferentes cenários de simulação, sendo a média da velocidade dos nós exibida a cada 50 segundos. Em [Yoon et al. 2003], foi proposto alterar-se o intervalo de escolha de velocidades para [1,19] m/s ou outro intervalo com V_{min} significativamente maior que zero de forma a se obter a estabilização da velocidade média dos nós na rede logo após o período transitório da simulação, que neste caso foi aproximadamente 400 segundos, enquanto que a nova proposta neste mesmo tempo atinge estabilização com escolha de velocidades em (0,20] m/s.

A Tabela 1 apresenta valores para a média temporal da velocidade (\bar{V}_{sim}) obtidos na simulação C++ para o modelo RWP modificado. \bar{V}_{sim} foi adquirida tomando-se a média

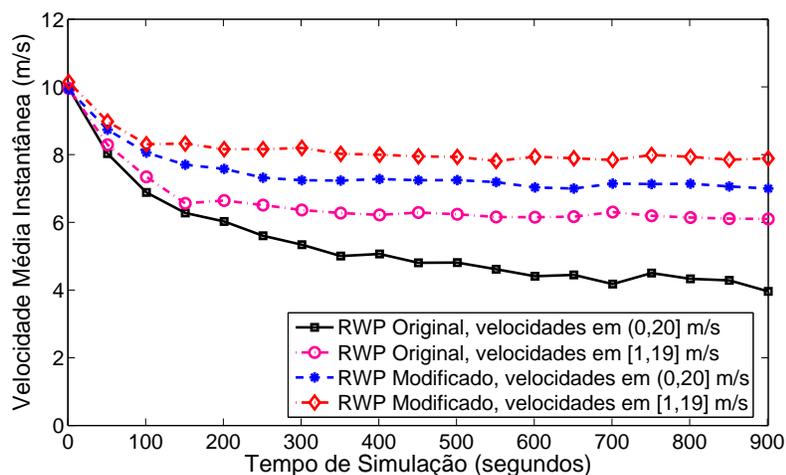


Figura 3. Velocidade média instantânea em função do tempo de simulação nos modelos RWP original e modificado com intervalos de escolha de velocidades dados por (0, 20] m/s, [1, 19] m/s, e tempo de pausa nulo.

Tabela 1. \bar{V}_{inic} , \bar{V}_{orig} , \bar{V}_{modif} e \bar{V}_{sim} para alguns intervalos de escolha de velocidades. Unidade é m/s.

Intervalo de velocidade	\bar{V}_{inic}	\bar{V}_{orig}	\bar{V}_{modif}	\bar{V}_{sim}
(0,20]	10	0	6,67	6,92
[1,19]	10	6,11	7,84	7,86
[2,18]	10	7,28	8,44	8,50
[3,17]	10	8,07	8,87	8,88
[4,16]	10	8,66	9,21	9,20
[5,15]	10	9,10	9,47	9,46
[6,14]	10	9,44	9,67	9,66
[7,13]	10	9,69	9,82	9,79
[8,12]	10	9,87	9,91	9,92
[9,11]	10	9,97	9,98	9,97
[1,21]	11	6,57	8,54	8,62
[2,22]	12	8,34	9,91	9,92
[3,23]	13	9,82	11,16	11,19
[4,24]	14	11,16	12,35	12,37
[5,25]	15	12,43	13,49	13,49
[6,26]	16	13,64	14,61	14,72
[7,27]	17	14,82	15,71	15,73
[8,28]	18	15,96	16,80	16,82
[9,29]	19	17,09	17,87	17,91
[10,30]	20	18,20	18,94	19,01

de 10 diferentes cenários para um tempo total de simulação de 1000 segundos numa rede de dimensões 1500m x 500m contendo 50 nós móveis, onde os primeiros 500 segundos foram desprezados devido ao período transitório inicial. Esta tabela também mostra a velocidade inicial média \bar{V}_{inic} definida como $\frac{V_{max}+V_{min}}{2}$, \bar{V}_{orig} calculada de acordo com a Eq. (9) [Yoon et al. 2003], e \bar{V}_{modif} obtida da Eq. (15). Observa-se concordância entre os valores obtidos na simulação (\bar{V}_{sim}) e os obtidos pela análise (\bar{V}_{modif}), e que $\bar{V}_{modif} > \bar{V}_{orig}$ confirmando que não só a proposta de modificação resolve o problema do decaimento da velocidade média dos nós na rede, como também resulta que a média temporal da velocidade do nó é mais próxima do valor \bar{V}_{inic} do que no caso do modelo RWP original.

4. Simulações no JiST/SWANS

No intuito de mostrar a importância de se empregar um modelo de mobilidade estável ao analisar desempenho de redes *ad hoc*, foram realizadas algumas simulações dos modelos RWP original e modificado no simulador JiST/SWANS [JiST/SWANS 2008], utilizando a biblioteca SSJ [SSJ 2008] e as classes que implementam a mobilidade alterando-as de acordo com as necessidades. Os resultados referentes à velocidade são similares aos obtidos na simulação em C++ e apresentados nas Figs. 1 e 3 e na Tabela 1. Foram empregados cenários de simulação e medidas de desempenho análogos aos trabalhos anteriores relacionados [Yoon et al. 2003], [Broch et al. 1998]. No caso, aqui se usou 50 nós movendo-se em uma rede de área retangular de dimensões 1500m x 500m com os nós executando o modelo de mobilidade RWP original ou modificado. Foi utilizado tempo de pausa nulo já que o mesmo não interfere significativamente 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 e [1,19] m/s de acordo com as distribuições uniforme, descrita na Eq. (2) para o RWP original, e a proposta na Eq. (10) para o RWP modificado. 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. Para roteamento foi utilizado o protocolo *Ad Hoc On-Demand Distance Vector* (AODV) [Perkins and Royer 1999]. 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 que têm impacto na sobrecarga (*overhead*), na vazão (*throughput*), e na qualidade de serviço (QoS) das aplicações que utilizam redes *ad hoc* sem fio.

Os resultados de cada medida avaliada foram calculados a cada 100 segundos, gerando desta forma 9 pontos diferentes de zero para um tempo total de 900 segundos. Considerou-se o seguinte conjunto de medidas de desempenho e respectivos resultados:

- *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, assim um pacote que percorre cinco nós contabilizará cinco pacotes de controle [Yoon et al. 2003], [Perkins and Rover 1999]. A Fig. 4 ilustra o resultado obtido para a simulação.

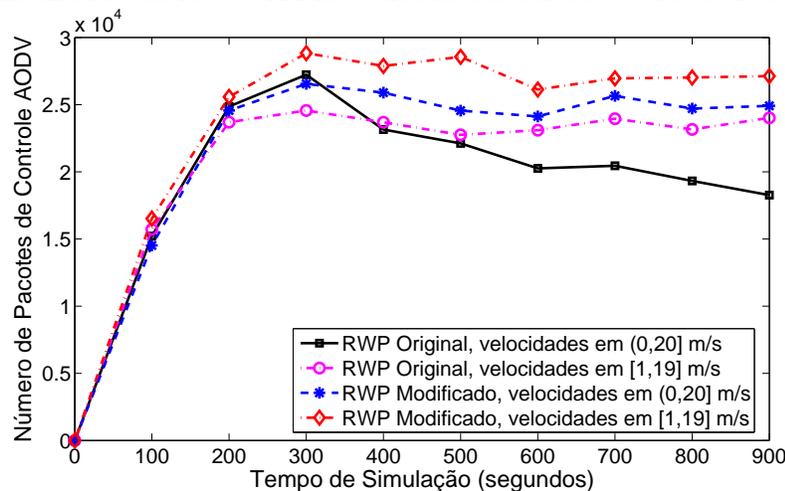


Figura 4. Número de pacotes de controle de roteamento AODV em função do tempo de simulação.

Percebe-se claramente o efeito da queda consistente da velocidade média instantânea dos nós no caso do modelo RWP original com intervalo de escolha de velocidades

em $(0,20]$ m/s. Isso também pode ser entendido observando-se que à medida em que o tempo passa a rede tende a se tornar mais estática requisitando menos pacotes de controle para estabelecer e manter as rotas no AODV. Nas demais curvas, onde a velocidade média instantânea atinge regime estacionário, nota-se a estabilização nas medidas.

- *Pacotes de dados descartados*: Esta medida descreve o número de pacotes perdidos que ocorrem na rede ao se transmitir pacotes de dados. Estas perdas podem acontecer em qualquer das camadas (física, enlace, etc.) devido a erros de transmissão, colisões, etc., o que impede que pacotes de dados sejam entregues aos seus destinos. A Fig. 5 também apresenta o efeito do decaimento da velocidade para o RWP original com intervalo de escolha de velocidades em $(0,20]$ m/s, enquanto que para o modelo RWP modificado observa-se estabilização desta medida.

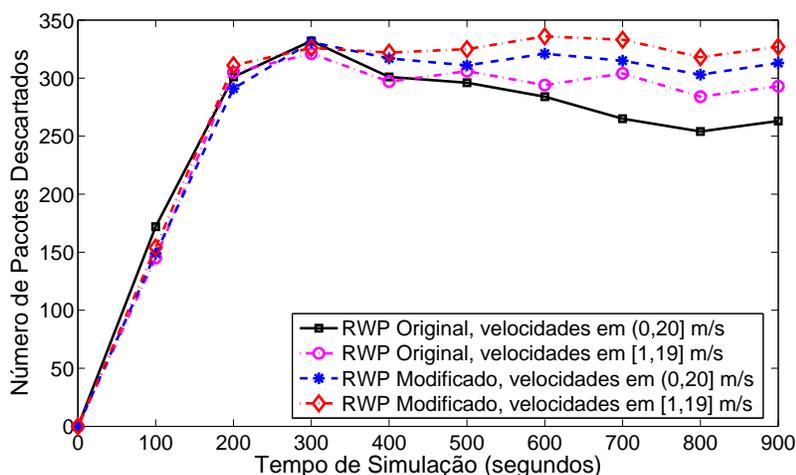


Figura 5. Número de pacotes de dados descartados em função do tempo de simulação.

- *Atraso de entrega de pacote de dados*: Quantifica o tempo médio despendido pelos pacotes de dados desde o momento de suas transmissões nas fontes até suas entregas com sucesso nos destinos. Esta medida também indica a influência da mobilidade no desempenho da rede, conforme ilustrado na Fig. 6. O modelo RWP original com intervalo de escolha de velocidades em $(0,20]$ m/s apresenta atraso médio menor, já que sua tendência estática com o passar do tempo, devido ao decaimento médio da velocidade dos nós, ajuda a manter as rotas mais atualizadas em relação caso do modelo RWP modificado que é mais dinâmico e necessita de mais tempo para estabelecer e manter rotas causando assim maiores atrasos.

5. Conclusão

Este trabalho propôs e analisou uma modificação no modelo de mobilidade *Random Way-point* (RWP) de modo a estabilizar a velocidade média instantânea dos nós evitando seu decaimento com o tempo quando se usa, para escolha das velocidades dos nós, um limite inferior igual a zero e seleção da velocidade a partir de uma função densidade de probabilidade uniforme. A proposta usou uma função baseada na distribuição $BETA(2, 2)$ para escolha das velocidades dos nós, porém mantendo algumas características da densidade uniforme

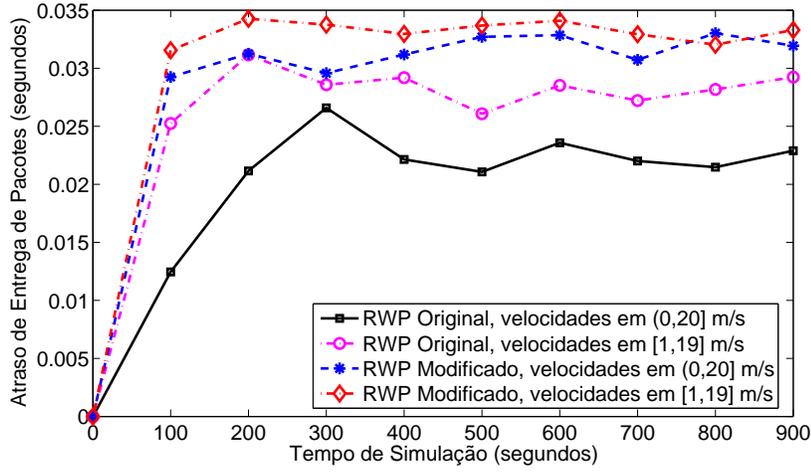


Figura 6. Atraso de entrega de pacote de dados em função do tempo de simulação.

como distribuição simétrica em torno da média cujo valor é igual ao da uniforme no RWP original. A alteração aqui proposta pode ser facilmente implementada nos simuladores de rede pela simples mudança numa chamada de função para escolha das velocidades dos nós. Foram apresentados resultados analíticos e também os obtidos por simulação que mostram que a alteração estabiliza o modelo de mobilidade RWP e as medidas de desempenho de rede investigadas.

Agradecimentos

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

Apêndice

Prova do Teorema 2

Para calcular a função densidade de probabilidade da variável aleatória S do tempo de viagem, obtem-se primeiramente sua distribuição de probabilidade $P(S \leq s)$ a partir da Fig. 7, observando os três casos possíveis de valores que S pode assumir. Considerou-se que as variáveis aleatórias R e V são independentes, devido as Proposições 1 e 2, e que suas funções densidade de probabilidade são dadas pelas Eqs. (4) e (10), respectivamente.

(i) Para o intervalo $s \geq \frac{R_{max}}{V_{min}}$ (ou $R_{max} \leq V_{min}s$), tem-se

$$P(S \leq s) = \int_{V_{min}}^{V_{max}} \int_0^{R_{max}} f_{R,V}(r, v) dr dv = 1. \quad (17)$$

(ii) Para o intervalo $\frac{R_{max}}{V_{max}} \leq s \leq \frac{R_{max}}{V_{min}}$ (ou $V_{min}s \leq R_{max} \leq V_{max}s$), obtem-se

$$P(S \leq s) = \underbrace{\int_{V_{min}}^{\frac{R_{max}}{s}} \int_0^{vs} f_{R,V}(r, v) dr dv}_{I_1} + \underbrace{\int_{\frac{R_{max}}{s}}^{V_{max}} \int_0^{R_{max}} f_{R,V}(r, v) dr dv}_{I_2}. \quad (18)$$

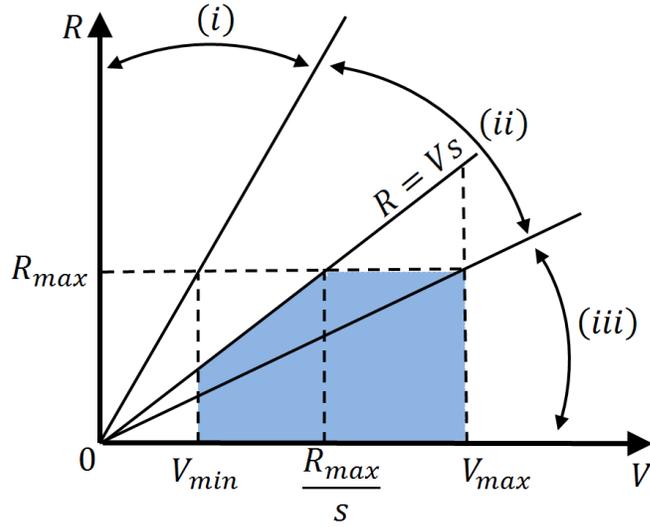


Figura 7. Gráfico que relaciona a variável aleatória distância percorrida R com a variável aleatória velocidade do nó V .

Resolvendo para I_1 , e usando da independência entre as variáveis aleatórias R e V e respectivas funções densidade de probabilidade, tem-se

$$\begin{aligned}
 I_1 &= \int_{V_{min}}^{\frac{R_{max}}{s}} f_V(v) \int_0^{vs} \frac{2r}{R_{max}^2} dr dv = \frac{s^2}{R_{max}^2} \int_{V_{min}}^{\frac{R_{max}}{s}} v^2 f_V(v) dv \\
 &= \frac{s^2}{R_{max}^2} \left[- \int_{V_{min}}^{\frac{R_{max}}{s}} \frac{6v^2}{(V_{max}-V_{min})^3} \left(v - \frac{V_{max}+V_{min}}{2} \right)^2 dv + \frac{3}{2(V_{max}-V_{min})} \int_{V_{min}}^{\frac{R_{max}}{s}} v^2 dv \right] \\
 &= \frac{1}{(V_{max}-V_{min})^3} \left[- \frac{6R_{max}^3}{5s^3} + \frac{3(V_{max}+V_{min})R_{max}^2}{2s^2} - \frac{2V_{max}V_{min}R_{max}}{s} + \frac{V_{min}^4(V_{max}-\frac{3}{5}V_{min})s^2}{2R_{max}^2} \right].
 \end{aligned} \tag{19}$$

Analogamente, para I_2 resulta

$$\begin{aligned}
 I_2 &= \int_{\frac{R_{max}}{s}}^{V_{max}} f_V(v) \int_0^{R_{max}} \frac{2r}{R_{max}^2} dr dv = \int_{\frac{R_{max}}{s}}^{V_{max}} f_V(v) dv \\
 &= \frac{1}{(V_{max}-V_{min})^3} \left[\frac{2R_{max}^3}{s^3} - \frac{3(V_{max}+V_{min})R_{max}^2}{s^2} + \frac{6V_{max}V_{min}R_{max}}{s} - 2V_{max}^3 - 6V_{max}^2V_{min} \right. \\
 &\quad \left. + 3(V_{max}+V_{min})V_{max}^2 \right].
 \end{aligned} \tag{20}$$

Juntando I_1 e I_2 e rearrumando os termos, tem-se que

$$\begin{aligned}
 P(S \leq s) &= \frac{1}{(V_{max}-V_{min})^3} \left[\frac{4R_{max}^3}{5s^3} - \frac{3(V_{max}+V_{min})R_{max}^2}{2s^2} + \frac{4V_{max}V_{min}R_{max}}{s} + \frac{V_{min}^4(V_{max}-\frac{3}{5}V_{min})s^2}{2R_{max}^2} \right. \\
 &\quad \left. - 2V_{max}^3 - 6V_{max}^2V_{min} + 3(V_{max}+V_{min})V_{max}^2 \right].
 \end{aligned} \tag{21}$$

(iii) Para o intervalo $0 \leq s \leq \frac{R_{max}}{V_{max}}$ (ou $0 \leq V_{max}s \leq R_{max}$), resulta que

$$\begin{aligned}
P(S \leq s) &= \int_{V_{min}}^{V_{max}} \int_0^{vs} f_{R,V}(r,v) dr dv = \frac{s^2}{R_{max}^2} \int_{V_{min}}^{V_{max}} v^2 f_V(v) dv \\
&= \frac{s^2}{R_{max}^2 (V_{max} - V_{min})^3} \left[-\frac{6}{5} (V_{max}^5 - V_{min}^5) + \frac{3}{2} (V_{max} + V_{min}) (V_{max}^4 - V_{min}^4) \right. \\
&\quad \left. - 2V_{max} V_{min} (V_{max}^3 - V_{min}^3) \right] \\
&= \frac{K s^2}{R_{max}^2 (V_{max} - V_{min})^3}, \tag{22}
\end{aligned}$$

onde $K = -\frac{6}{5} (V_{max}^5 - V_{min}^5) + \frac{3}{2} (V_{max} + V_{min}) (V_{max}^4 - V_{min}^4) - 2V_{max} V_{min} (V_{max}^3 - V_{min}^3)$.

Diferenciando $P(S \leq s)$ em relação a s , obtem-se a função densidade de probabilidade da variável aleatória S como segue

$$\begin{aligned}
f_S(s) &= \frac{dP(S \leq s)}{ds} \\
&= \begin{cases} \frac{2Ks}{R_{max}^2 (V_{max} - V_{min})^3} & 0 \leq s \leq \frac{R_{max}}{V_{max}} \\ -\frac{12R_{max}^3}{5(V_{max} - V_{min})^3 s^4} + \frac{3(V_{max} + V_{min}) R_{max}^2}{(V_{max} - V_{min})^3 s^3} - \frac{4V_{max} V_{min} R_{max}}{(V_{max} - V_{min})^3 s^2} & \frac{R_{max}}{V_{max}} \leq s \leq \frac{R_{max}}{V_{min}} \\ +\frac{V_{min}^4 (V_{max} - \frac{3}{5} V_{min}) s}{R_{max}^2 (V_{max} - V_{min})^3} & \\ 0 & s \geq \frac{R_{max}}{V_{min}}, \end{cases} \tag{23}
\end{aligned}$$

o que finaliza a prova do Teorema 2. ■

Prova do Corolário 1

Da Eq. (23) pode-se calcular a média do tempo de jornada da seguinte forma

$$\begin{aligned}
E[S] &= \int_0^\infty s f_S(s) ds \\
&= \int_0^{\frac{R_{max}}{V_{max}}} \frac{2Ks^2}{R_{max}^2 (V_{max} - V_{min})^3} ds + \int_{\frac{R_{max}}{V_{max}}}^{\frac{R_{max}}{V_{min}}} \left[-\frac{12R_{max}^3}{5(V_{max} - V_{min})^3 s^3} + \frac{3(V_{max} + V_{min}) R_{max}^2}{(V_{max} - V_{min})^3 s^2} \right. \\
&\quad \left. - \frac{4V_{max} V_{min} R_{max}}{(V_{max} - V_{min})^3 s} + \frac{V_{min}^4 (V_{max} - \frac{3}{5} V_{min}) s^2}{R_{max}^2 (V_{max} - V_{min})^3} \right] ds \\
&= \frac{R_{max}}{(V_{max} - V_{min})^3} \left[\frac{2K}{3V_{max}^3} + \frac{9(V_{max}^2 - V_{min}^2)}{5} - 4V_{max} V_{min} \ln\left(\frac{V_{max}}{V_{min}}\right) + \frac{(V_{max} - \frac{3}{5} V_{min}) \left(V_{min} - \frac{V_{min}^4}{V_{max}^3} \right)}{3} \right], \tag{24}
\end{aligned}$$

o que finaliza a prova do Corolário 1. ■

Referências

- Tonguz, O. K. and Ferrari, G. (2006). *Ad Hoc Wireless Networks: A Communication-Theoretic Perspective*. John Wiley & Sons.
- Murthy, C. S. R. and Manoj, B.S. (2004). *Ad Hoc Wireless Networks: Architectures and Protocols*. Prentice Hall.
- Tanenbaum, A. S. (2002). *Computer Networks*. Prentice-Hall.
- Camp, T. , Boleng, J., and Davies, V. (2002). Mobility models for ad hoc networks simulations. *Wireless Communication and Mobile Computing (WCMC): Special issue on Mobile Ad Hoc Networking: Research, Trends and Applications*, 2(5):483–502.

- Perkins, D. D. , Hughes H. D., and Owen, C. B. (2002). Factors affecting the performance of ad hoc networks. *Proc. of IEEE International Conference on Communications (ICC)*, New York, NY, USA.
- Bettstetter, C. (2001). 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.
- Royer, E. M., Melliar-Smith, P. M., and Moser, L. E. (2001). An analysis of the optimum node density for ad hoc mobile networks. *Proc. of IEEE International Conference on Communications (ICC)*, Helsinki, Finland.
- Yoon, J., Liu, M., and Noble, B. (2003). Random waypoint considered harmful. *Proc. of IEEE Conference on Computer Communications (INFOCOM)*, San Francisco, CA, USA.
- Broch, J., Maltz, D. A., Johnson, D. B., Hu, Y.-C., and Jetcheva, J. (1998). 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.
- Chiang, C-C. and Gerla, M. (1998). On-demand multicast in mobile wireless networks. *Proc. of International Conference on Network Protocols (ICNP)*, Austin, TX, USA.
- Perkins, C. E., Royer, E. M., Das, S. R., and Karina, M. K. (2001). Performance comparison of two on-demand routing protocols for ad hoc networks. *IEEE Personal Communications*, 8(1):16–28.
- Jayakumar, G. and Gopinath, G. (2008). Performance comparison of two on-demand routing protocols for ad-hoc networks based on random way point mobility model. *American Journal of Applied Sciences*, 5(6):649–664.
- Garcia-Luna-Aceves, J.J. and Spohn, M. (1999). Source-tree routing in wireless networks. *Proc. of International Conference on Network Protocols (ICNP)*, Toronto, Canada.
- JiST/SWANS: Java in Simulation Time / Scalable Wireless Ad Hoc Network Simulator. (2008). <http://jist.ece.cornell.edu/>
- Schildt, H. (2002). *C++: The Complete Reference*. McGraw-Hill Osborne Media.
- Papoulis, A. and Pillai, S. U. (2002). *Probability, Random Variables and Stochastic Processes*. McGraw Hill.
- GSL: GNU Scientific Library. (2008). <http://www.gnu.org/software/gsl/>
- SSJ: Stochastic Simulation in Java. (2008). <http://www.iro.umontreal.ca/~simardr/ssj/indexe.html>
- Horstmann, C. S. and Cornell, G. (2004). *Core Java (TM) 2, Vol. I Fundamentals*. Prentice Hall.
- Perkins, C. E. and Royer, E. M. (1999). Ad-hoc on-demand distance vector routing. *Proc. of IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications*, New Orleans, LA, USA.