

# Capacidade de Canal em Redes *Ad Hoc* Densas

Lucas Rodrigues de Paula e Renato Mariz de Moraes

**Resumo**—O presente trabalho faz a análise do comportamento da capacidade do canal de comunicação de uma rede *ad hoc* móvel em função do número de nós. A partir do modelo de canal que considera atenuação com a distância e desvanecimento Rayleigh, foi proposta uma alteração tal que, ao transmissor se aproximar arbitrariamente do receptor, o ganho do canal dependa apenas do desvanecimento, de forma que a potência recebida não seja maior que a transmitida. Resultados obtidos analiticamente e por simulação mostram que a capacidade decai a zero com o aumento da densidade de nós na rede.

**Palavras-Chave**— Capacidade, MANETs, Redes *Ad Hoc*, SNIR.

**Abstract**—The present work investigates the behavior of the communication channel capacity of a mobile *ad hoc* network as a function of the number of nodes. From the channel model that considers attenuation with the distance and Rayleigh fading, a change was proposed such that, as the transmitter arbitrarily approximates to the receiver, the channel gain depends only on the fading, in order to have the received power not greater than the transmitted power. Results were obtained analytically and by simulations and they show that the capacity goes to zero as the node density in the network increases.

**Keywords**—Ad Hoc Networks, Capacity, MANETs, SNIR.

## I. INTRODUÇÃO

A tendência em reduzir a infraestrutura das redes sem fio deu origem às redes *ad hoc* móveis (MANETs, do inglês *mobile ad hoc networks*). Uma MANET é um sistema de nós móveis com capacidade de roteamento, conectados através de um enlace de rádio, formando uma rede, que pode ser isolada (sem conexão com outras redes) ou a extensão de uma rede cabeada tradicional [1]. Algumas aplicações das MANETs são [1]: operações militares táticas, permitindo a comunicação entre militares em ambiente hostil; operações de busca e resgate, ou de socorro em desastres, já que, nessas situações, em geral, não se pode contar com uma infraestrutura de comunicação local; utilização comercial, permitindo o estabelecimento de comunicação em exposições, conferências e outros eventos que envolvam aglomerados de pessoas; comunicação rápida e segura em operações policiais; dentre outras.

As MANETs têm características próprias que as identificam e as tornam singulares. Algumas dessas características são:

- Canal físico não confiável, e sempre *half-duplex*;
- Topologia dinâmica (variante no tempo);
- Limitação em recursos como energia e largura de banda.

É por apresentarem essas especificidades que as MANETs necessitam de modelos matemáticos próprios. Uma preocupação natural é conhecer o comportamento da capacidade de canal [2], ou eficiência espectral, das MANETs quando as mesmas

se tornam densamente povoadas. Nestes casos os nós que se comunicam, isto é transmissor e receptor, podem situar-se muito próximos um do outro. Conseqüentemente, o modelo de propagação do canal deve ser empregado com cuidado para retratar mais fielmente o caso prático. Por exemplo, modelos que empreguem atenuação da potência recebida em função da distância que separa os dois nós deve prever a situação de redes densas para evitar que a potência recebida não seja maior que a transmitida.

O presente trabalho propôs uma alteração nos modelos anteriores que não consideravam redes densas, de forma que o ganho do canal dependa apenas do desvanecimento, para que a potência recebida seja igual à efetivamente transmitida quando o transmissor se aproximar arbitrariamente do receptor. Resultados obtidos analiticamente e por simulação mostram que a capacidade do canal vai a zero à medida em que a densidade do número de nós na rede cresce.

Este artigo está organizado da seguinte maneira. A Seção II traz as características essenciais da rede descrevendo brevemente o modelo anterior, com destaque para a forma do ganho de canal. A Seção III introduz as ideias para a construção de um novo modelo para o cálculo da capacidade do canal e obtém as equações de capacidade para dois casos diferentes da constante de atenuação com a distância. A Seção IV mostra os resultados obtidos a partir de simulações Monte-Carlo [3], comparando-os com as curvas obtidas das equações do modelo. Finalmente a Seção V conclui o artigo e comenta sobre desdobramentos futuros deste trabalho.

## II. CARACTERÍSTICAS GERAIS DO MODELO DA REDE

O modelo da rede utilizado para o cumprimento dos objetivos a que se propõe este trabalho foi proposto por Moraes *et al.* [4], em uma tentativa de fazer uma descrição matemática do comportamento da eficiência espectral em uma MANET. A motivação para isso vem de resultados obtidos por outros pesquisadores, como Gupta e Kumar [5], e Grossglauser e Tse [6]. Gupta e Kumar mostraram que a capacidade de uma rede *ad hoc* estática diminui com  $\frac{1}{\sqrt{n}}$ , sendo  $n$  o número de nós na rede. Grossglauser e Tse propuseram um esquema de repasse de pacotes para MANETs em duas fases, em que cada nó sempre se utiliza de seu vizinho mais próximo para encaminhar a mensagem ao receptor. O esquema mostrou que a capacidade de redes *ad hoc* móveis permanece constante à medida em que as mesmas se tornam mais densas. Isso se deve ao fato de que a comunicação se dá, sempre, entre os vizinhos mais próximos, fazendo com que a potência do sinal recebido supere a interferência gerada pelos outros nós transmissores da rede.

As características essenciais do modelo abordado neste trabalho são [4]:

- Os nós se movem na rede segundo o modelo de mobilidade uniforme, isto é, eles estão uniformemente distribuídos na área ocupada pelos mesmos. A direção de movimento de cada um deles é uniforme no intervalo  $[0, 2\pi)$ , mas condicionada à posição ocupada por cada nó. As posições dos nós são independentes umas das outras em qualquer instante de tempo  $t$ ;
- Assume-se uma rede circular de área normalizada a unidade;
- A cada intervalo de tempo para comunicação, uma fração de nós é escolhida para atuar como transmissores, ficando o restante dos nós como receptores;
- Cada nó transmite, sempre, para um vizinho próximo, localizado dentro de uma célula de raio  $r_0$ ;
- Consideram-se parâmetros como distância euclidiana, desvanecimento, constante de atenuação do meio, número de nós na rede, fração de nós transmissores, potência de transmissão, assumida constante para qualquer nó da rede, e canal gaussiano.

#### A. Modelo Analítico

Para que a comunicação na rede seja viável, é necessário que a capacidade de canal seja superior a um certo limiar, implicando em dizer que a relação sinal-ruído-interferência (*SNIR*, do inglês *Signal to Noise and Interference Ratio*) deva assumir um valor mínimo para que a transferência de informação possa acontecer. Matematicamente, isso significa que [4]:

$$SNIR = \frac{P_i(t)g_{i,j}(t)}{N_0 + \frac{1}{L} \sum_{k \neq i} P_k(t)g_{k,j}(t)} = \frac{P_i(t)g_{i,j}(t)}{N_0 + \frac{1}{L}I} \geq \beta, \quad (1)$$

onde  $P_i(t)$  é a potência de transmissão do nó  $i$ ;  $g_{ij}(t)$  é o ganho do canal na transmissão do nó  $i$  ao nó  $j$  e constitui a principal diferença entre o modelo anterior e o abordado neste trabalho. Ele é função da distância euclidiana entre os nós, da constante de atenuação do meio,  $\alpha$ , e da variável aleatória (VA) quadrática  $\chi^2$ , referente ao desvanecimento aqui assumido como Rayleigh;  $N_0$  é a densidade espectral de potência do ruído;  $L$  é o ganho de processamento;  $I$  é a interferência total devida aos demais nós transmissores e  $\beta$  é o menor valor da *SNIR* para o qual a comunicação seja possível.

Considerando uma fração de transmissores  $\theta$ , onde  $\theta \in (0, 1)$ , e uma densidade de nós igual a  $\rho$ , o número de nós transmissores situados em uma célula de raio  $r$  é  $n_T(r) = \pi r^2 \theta \rho$ . Como a área da rede é assumida unitária, a quantidade de nós é numericamente igual à densidade de nós na rede, já que  $\rho = n/1$ . Fazendo-se  $n_T(r)$  igual a 1 e resolvendo para  $r$ , obtém-se o raio  $r_0$  de uma célula contendo apenas um transmissor em média. Logo,

$$r_0 = \frac{1}{\sqrt{\theta n \pi}}. \quad (2)$$

Visto que o modelo de mobilidade uniforme é aqui considerado, resulta que os nós estejam uniformemente distribuídos na área da rede, mas é interessante saber como esses mesmos nós se distribuem em relação à distância ao centro da rede. É possível mostrar que a função densidade de probabilidade da

distribuição dos nós em função da distância  $r_c$  ao centro da rede é linear, e dada por [7]:

$$f_{R_c}(r_c) = \begin{cases} 2\pi r_c & 0 \leq r_c \leq 1/\sqrt{\pi} \\ 0 & \text{caso contrário,} \end{cases} \quad (3)$$

onde  $r_c$  é a distância do nó ao centro da rede circular.

Este trabalho considera situações onde o número de nós ( $n$ ) na rede é grande. Além disso, devido ao modelo de mobilidade adotado (uniforme), os nós se encontram uniformemente distribuídos em relação à área. Esses fatos permitem aproximar a distribuição dos nós por uma distribuição contínua, de forma a substituir o somatório das interferências na Eq. (1), geradas por cada nó ao receptor, por uma integral. O motivo de se fazer tal aproximação reside em facilitar o desenvolvimento das expressões, sem contudo, levar à perdas de significado. Outrossim, os resultados analíticos obtidos com este modelo ficaram muito próximos aos da simulação Monte-Carlo, conforme mostrado na Seção IV, validando portanto a aproximação empregada.

Devido ao fato de a área da rede ser circular, e de já se estar adotando o sistema de coordenadas polares para a localização dos nós, a divisão da área em elementos diferenciais é feita de acordo com o esquema polar, conforme a Fig. 1.

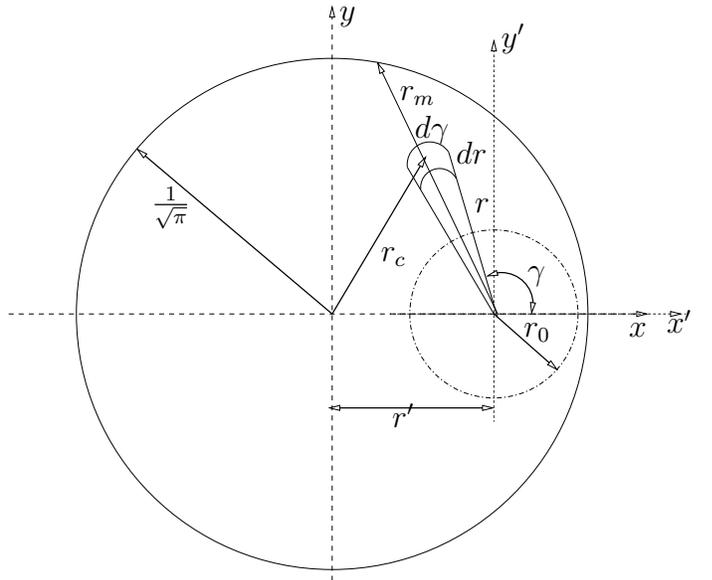


Fig. 1. Ilustração do modelo, que divide a rede em elementos diferenciais, cada qual gerando uma interferência  $dI$  no receptor. Para efeitos de análise o receptor dista  $r'$  unidades do centro da rede, estando localizado no centro da célula de raio  $r_0$ , para um dado instante de tempo  $t$ .

O elemento diferencial de área contém uma quantidade diferencial de nós igual a  $dn = \rho r dr d\gamma$ , sendo  $\rho$  a densidade de nós na área. Esse elemento gera, então, uma interferência diferencial no nó receptor localizado no centro da célula de raio  $r_0$ , dada por:

$$dI = \rho \theta P g r dr d\gamma, \quad (4)$$

onde  $g$  representa o ganho do canal de comunicação entre o transmissor e o receptor.

#### B. Modelo Anterior de Propagação

Modelos anteriores consideravam que o ganho  $g$  variava com o inverso da distância  $r$  entre transmissor e receptor

elevada a um fator de atenuação  $\alpha$  [4], [5], [6], *i.e.*,

$$g(\alpha, r, \chi^2) = \frac{\chi^2}{r^\alpha}. \quad (5)$$

Como consequência, a potência do sinal recebido se torna infinita quando transmissor e receptor se aproximam arbitrariamente, fazendo com que a *SNIR* convirja para um valor diferente de zero quando o número de nós torna-se infinitamente grande na rede. Dizendo de outra forma, com o aumento do número de nós na rede, o aumento arbitrário da potência recebida devido à redução da distância entre transmissor e receptor compensa o aumento da interferência dos demais transmissores na rede [4].

### III. DESENVOLVIMENTO COM UM NOVO MODELO DE PROPAGAÇÃO

Visto que o modelo de propagação anterior apresenta limitações de aplicação em redes densas, este trabalho propõe uma alteração de forma a estender a análise anterior a qualquer tipo de densidade de redes. O ganho  $g(\alpha, r, \chi^2)$  da forma como foi definido no modelo anterior é o grande responsável por essa limitação. Deve-se buscar uma expressão matemática que descreva o decaimento da potência, como no modelo anterior nas situações onde a limitação não ocorra, e que tenha outro comportamento, mais realista, quando o transmissor estiver arbitrariamente próximo ao receptor.

Seja então  $g'(\alpha, \chi^2, r)$  a função que descreverá o comportamento do ganho no novo modelo. Espera-se que esta tenha as seguintes propriedades:

$$\lim_{r \rightarrow \infty} g'(\alpha, \chi^2, r) = \lim_{r \rightarrow \infty} g(\alpha, \chi^2, r) = 0 \quad (6)$$

$$\lim_{r \rightarrow 0} g'(\alpha, \chi^2, r) = \chi^2. \quad (7)$$

Ou seja, à distâncias infinitamente grandes entre transmissor e receptor, o ganho deve ser nulo, para que a potência recebida seja igual a zero. Além disso, quando o transmissor se aproximar arbitrariamente do receptor, o ganho deve depender apenas do desvanecimento. Assim, as propriedades descritas nas Eqs. (6) e (7) devem ser satisfeitas para que o modelo descreva com um pouco mais de realismo o que acontece na prática.

Existem várias expressões que satisfazem as propriedades desejadas. Aqui, adotou-se uma escolha particular, que tem a vantagem de ter o mesmo comportamento da expressão para o ganho no modelo anterior, em situações onde transmissor e receptor estejam arbitrariamente afastados. Por outro lado, esta proposta de decaimento do ganho como função do inverso da distância acrescida de uma unidade foi proposta por autores que investigaram a escalabilidade de redes *ad hoc* densas [8], [9], [10]. A alteração acrescida do efeito do desvanecimento resulta:

$$g'(\alpha, \chi^2, r) = \frac{\chi^2}{(1+r)^\alpha}. \quad (8)$$

Esta relação satisfaz às Eqs. (6) e (7). Essa pequena alteração na variável aleatória ganho terá um efeito significativo nos resultados finais, conforme será mostrado a seguir.

Para o desenvolvimento matemático, surge a necessidade de se considerar duas situações particulares:  $\alpha > 2$  e  $\alpha = 2$ . Isso

porque a integração do elemento diferencial de interferência descrito na Eq. (4) segue caminhos distintos para cada uma das situações.

#### A. O Caso $\alpha > 2$

Partindo da Eq. (1) e adotando-se um ganho de processamento unitário, é necessário obter a relação que existe entre os seus elementos e o número de nós  $n$ . O primeiro deles é a potência do sinal recebido, que aparece no numerador. O segundo é a interferência total no receptor. Como o primeiro elemento é mais simples de ser demonstrado, este será desenvolvido primeiro.

1) *Potência Média Recebida*: Da Eq. (1), a potência  $P_{ij}$  que o nó  $j$  recebe do nó  $i$  é dada por  $P_i(t)g'_{ij}(t)$ . Como se está admitindo que todos os nós transmissores enviam informação pelo canal a uma mesma potência  $P$ , e considerando a Eq. (8),  $P_{ij}$  resulta na seguinte expressão:

$$P_{ij} = \frac{P\chi^2}{(1+r)^\alpha}. \quad (9)$$

Como  $P_{ij}$  depende da variável aleatória que descreve o desvanecimento,  $P_{ij}$  também é uma VA. Então, é necessário que se compute o valor esperado da expressão anterior. Sendo  $E(\chi^2) = e^{(\delta\sigma)^2}$  [11], onde  $\delta = \ln 10/10$ , a esperança de  $P_{ij}$ , para uma dada distância  $r$  entre os nós  $i$  e  $j$ , é dada por:

$$E[P_{ij}] = \frac{Pe^{(\delta\sigma)^2}}{(1+r)^\alpha}. \quad (10)$$

2) *Interferência Total Média*: Conforme mencionado na Seção II-A, devido ao uso do modelo de mobilidade uniforme, que resulta em uma distribuição uniforme dos nós na rede, e considerando uma alta densidade de nós, o modelo adotado para a distribuição dos nós é aproximadamente contínuo, de forma que a interferência total pode ser aproximada pela contribuição de todos os elementos diferenciais de área que geram, cada um, uma interferência  $dI$ , de acordo com a Eq. (4). Assim, a interferência é dada por:

$$I = \int_{r_0}^{r_m(\gamma, r')} \int_0^{2\pi} \theta P g'(\alpha, \chi^2, r) \rho r dr d\gamma, \quad (11)$$

sendo  $r_m$  o valor máximo que  $r$  pode assumir para cada valor do ângulo  $\gamma$ . Observando a Fig. 1, e considerando-se  $x$  e  $y$  como dois pontos genéricos da circunferência delimitadora da rede, observa-se que

$$r_m = \sqrt{\frac{1}{\pi} - (r' \sin \gamma)^2} - r' \cos \gamma. \quad (12)$$

Resolvendo-se a Eq. (11) e substituindo-se as variáveis  $r_0$  e  $r_m$  dadas, respectivamente pelas Eqs. (2) e (12), obtém-se a interferência total em função da VA  $\chi^2$  relativa ao desvanecimento:

$$\begin{aligned} I &= \int_0^{2\pi} \int_{r_0}^{r_m(\gamma, r')} \frac{\theta n P \chi^2 r}{(1+r)^\alpha} dr d\gamma \\ &= \theta n P \chi^2 \int_0^{2\pi} \int_{r_0}^{r_m} \frac{(1+r_m)^{1-\alpha} [r_m(1-\alpha)-1] - [(1+r_0)^{1-\alpha} (r_0(1-\alpha)-1)]}{(1-\alpha)(2-\alpha)} d\gamma \\ &= \theta n P \chi^2 \int_0^{2\pi} \frac{(1+r_m)^{1-\alpha} [r_m(1-\alpha)-1] d\gamma - 2\pi [(1+r_0)^{1-\alpha} r_0(1-\alpha)-1]}{(2-\alpha)(1-\alpha)} \\ &= \frac{\theta n P \chi^2}{(1-\alpha)(2-\alpha)} [f_\alpha(r') - 2\pi(1+r_0)^{1-\alpha} (r_0(1-\alpha)-1)], \quad (13) \end{aligned}$$

onde

$$f_{\alpha}(r') = \int_0^{2\pi} (1 + r_m(\gamma, r'))^{1-\alpha} (r_m(\gamma, r')) d\gamma.$$

Como no caso da potência recebida a interferência é uma variável aleatória, pois depende de  $\chi^2$ , será considerado então o seu valor médio na expressão para a capacidade. Calculando a esperança, resulta em:

$$E[I] = \frac{\theta n P e^{(\delta\sigma)^2}}{(1-\alpha)(2-\alpha)} [f_{\alpha}(r') - 2\pi(1+r_0)^{1-\alpha}(r_0(1-\alpha)-1)]. \quad (14)$$

3) *Obtenção da SNIR e da Capacidade:* Substituindo-se as Eqs. (10) e (14) na Eq. (1), obtém-se:

$$\begin{aligned} \overline{SNIR} &= \frac{E[P_0]}{E[I] + N_0} \quad (15) \\ &= \frac{P e^{(\delta\sigma)^2}}{N_0 \frac{(1+\sqrt{\theta n \pi})^{\alpha}}{(\theta n \pi)^{\frac{\alpha}{2}}} + \frac{P e^{(\delta\sigma)^2} \theta n}{(1-\alpha)(2-\alpha)} [f_{\alpha}(r') - 2\pi(1+r_0)^{1-\alpha}(r_0(1-\alpha)-1)]}. \end{aligned}$$

Finalmente, a capacidade é dada pela fórmula de Shannon em bits/s/Hz [2]:

$$\text{Capacidade} = \log_2 (1 + \overline{SNIR}). \quad (16)$$

Empregando L'Hopital é possível mostrar que a SNIR e a capacidade, conforme Eqs. (15) e (16), respectivamente, tendem a zero à medida que o número de nós na rede cresce, conforme também será ilustrado nos resultados na Seção IV.

#### B. O caso $\alpha = 2$

De maneira similar ao desenvolvimento das expressões matemáticas para a situação anterior, é possível mostrar que a  $\overline{SNIR}$  para  $\alpha = 2$  é dada pela seguinte expressão:

$$\overline{SNIR} = \frac{P \theta n \pi e^{(\delta\sigma)^2}}{N_0 (1 + \sqrt{\theta n \pi})^2 + (1 + \sqrt{\theta n \pi})^2 E[I]}, \quad (17)$$

onde

$$E[I] = P \theta n e^{(\delta\sigma)^2} \int_0^{2\pi} \left[ \ln \left( (\sqrt{\theta n \pi}) \left( \frac{1 + r_m(\gamma, r')}{1 + \sqrt{\theta n \pi}} \right) + h(\gamma) \right) \right]$$

e

$$h(\gamma) = \frac{\frac{1}{\sqrt{\theta n \pi}} - \sqrt{\frac{1}{\pi} - (r' \sin \gamma)^2} - r' \cos \gamma}{(1 + \sqrt{\theta n \pi}) \left( 1 + \sqrt{\frac{1}{\pi} - (r' \sin \gamma)^2} - r' \cos \gamma \right)}.$$

Novamente, utilizando L'Hopital, é possível mostrar que na Eq. (17) a SNIR vai a zero quando  $n$  cresce ao infinito, o que, pela Eq. (16) leva a capacidade a zero, sendo este comportamento também ilustrado nos resultados na próxima seção.

#### IV. RESULTADOS

Esta seção apresenta as curvas de capacidade em função do número  $n$  de nós na rede, utilizando-se as  $\overline{SNIR}$  dadas pelas Eqs. (15) e (17). São mostradas também as curvas oriundas de simulações Monte-Carlo [3] feitas com a utilização da biblioteca científica GNU [12] para validar os resultados.

A capacidade para o receptor localizado em diferentes pontos da rede considerando  $\alpha = 3$  para o novo modelo é mostrada na Fig. 2 e curvas comparativas entre o modelo novo e o anterior são apresentadas na Fig. 3.

Os resultados obtidos para diferentes localizações do transmissor estão em acordo com o esperado, com um comportamento semelhante ao gráfico correspondente do modelo

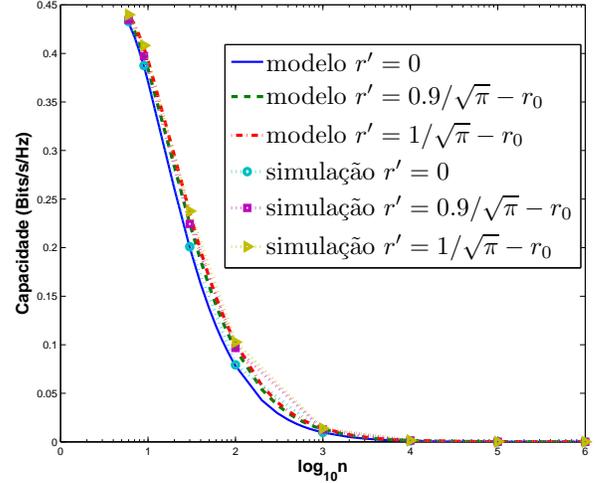


Fig. 2. Curva da eficiência espectral em função de  $n$  para o novo modelo, considerando  $P = 1W$ ,  $N_0 = 5$ ,  $\alpha = 3$ ,  $\theta = 1/3$ ,  $\sigma = 6$ . Os resultados foram obtidos para três posições distintas do nó receptor na rede: centro ( $r' = 0$ ), próximo a borda ( $r' = 0.9/\sqrt{\pi} - r_0$ ) e borda ( $r' = 1/\sqrt{\pi} - r_0$ ).

anterior: a eficiência espectral aumenta à medida em que se distancia do centro da rede, sendo máxima na borda da mesma. Isso se deve ao fato de que, nas bordas, o receptor fica sujeito a uma interferência menor. Entretanto, em todos os casos do novo modelo a capacidade vai a zero quando  $n$  cresce. Esta comparação demonstra que o modelo anterior não é realista para redes densas, visto que o efeito do crescimento sem limite da potência recebida devido a Eq. (5) compensa o aumento da interferência fazendo com que a capacidade tenda a um valor constante com o aumento do número de nós. Já o modelo modificado que propõe o decaimento conforme Eq. (8) se mostra mais realista já que a potência recebida não pode ser maior que a transmitida e com o aumento do número de nós a interferência cresce e domina a SNIR fazendo com que a capacidade vá a zero.

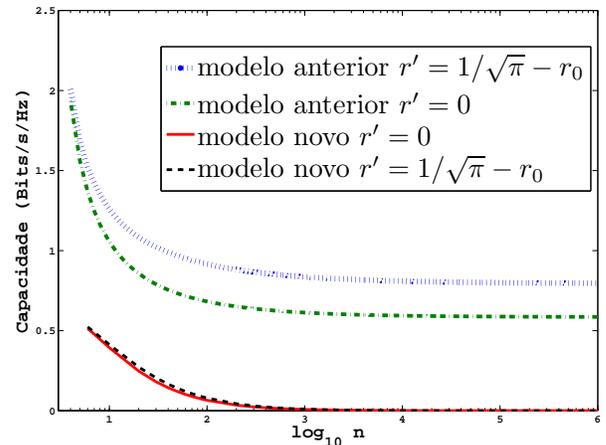
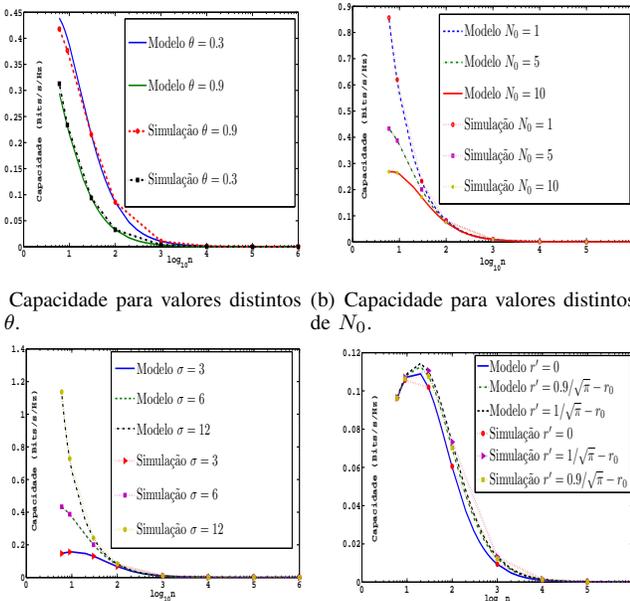


Fig. 3. Curva da eficiência espectral em função de  $n$ , considerando  $P = 1W$ ,  $N_0 = 5$ ,  $\alpha = 3$ ,  $\theta = 1/3$ ,  $\sigma = 6$ , para modelo anterior e para o novo modelo aqui proposto. Os resultados foram obtidos para duas posições distintas do nó receptor na rede (centro e borda).

A variação na fração de transmissores revelou o comportamento gráfico apresentado na Fig. 4(a). Observa-se que, com

o aumento da fração de nós transmissores, a interferência total torna-se maior, reduzindo a capacidade. Porém, à medida em que  $n$  aumenta, a capacidade vai a zero, independentemente do valor de  $\theta$ . Com a variação na densidade espectral de potência do ruído obteve-se a Fig. 4(b). O gráfico revela que a capacidade diminui à medida em que a densidade espectral de potência do ruído aumenta. Mais uma vez, a capacidade vai a zero à medida que  $n$  aumenta, independente do valor do ruído, pois para  $n$  grande a interferência domina o denominador da Eq. (1). A Fig. 4(c) apresenta o comportamento da capacidade quando se leva em consideração as possíveis variações no desvio padrão gaussiano associado ao desvanecimento Rayleigh. A Fig. 4(d) mostra o comportamento da capacidade quando não há desvanecimento, de onde se conclui que o desvanecimento não interfere no comportamento assintótico da rede. Em outras palavras, as Figs. 4(c) e 4(d) mostram que a influência do desvanecimento altera a escala vertical nos gráficos, porém não causa efeito no valor limite da capacidade, que vai a zero quando  $n$  cresce.



(a) Capacidade para valores distintos de  $\theta$ . (b) Capacidade para valores distintos de  $N_0$ . (c) Capacidade para valores distintos de  $\sigma$ . (d) Capacidade sem desvanecimento, para o receptor localizado em 3 pontos distintos: próximo à borda ( $r' = 0.9/\sqrt{\pi} - r_0$ ), na borda da rede ( $r' = 1/\sqrt{\pi} - r_0$ ) e no centro da mesma ( $r' = 0$ ).

Fig. 4. Resultados para o novo modelo. Em todas as figuras, os parâmetros são (à exceção quando explicitados)  $r' = 0$ ,  $\theta = 1/3$ ,  $\sigma = 6$ ,  $N_0 = 5$ ,  $P = 1W$ .

A Fig. 5 para  $\alpha = 2$ , mostra o comportamento gráfico da capacidade no novo modelo decaindo a zero à medida que  $n$  aumenta conforme constatado na seção III-B.

Em todos os casos investigados, os resultados obtidos pelo modelo e pela simulação Monte-Carlo apresentaram boa concordância.

## V. CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

Este artigo investigou o comportamento da capacidade de canal em redes *ad hoc*. Mostrou-se, utilizando um modelo de propagação que determina que a potência recebida não deve

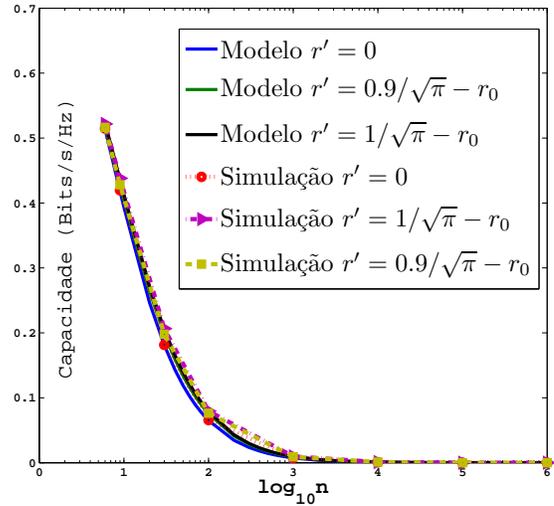


Fig. 5. Curva da eficiência espectral como função de  $n$  para o novo modelo, considerando  $P = 1W$ ,  $N_0 = 5$ ,  $\alpha = 2$ ,  $\theta = 1/3$ ,  $\sigma = 6$ . Os resultados foram obtidos para três posições distintas do nó receptor na rede: centro ( $r' = 0$ ), próximo a borda ( $r' = 0.9/\sqrt{\pi} - r_0$ ) e borda ( $r' = 1/\sqrt{\pi} - r_0$ ).

ser maior que a transmitida, que a capacidade de canal dos nós numa MANET decai a zero à medida que a densidade de usuários aumenta. Resultados analíticos e obtidos por simulação apresentaram boa concordância.

Como possíveis trabalhos futuros, o modelo pode ser alterado pela incorporação de características que não foram consideradas neste estudo, como por exemplo, considerar linha de visada direta entre os nós quando a distância entre eles diminui.

## REFERÊNCIAS

- [1] B. Tavli and W. Heinzelman, *Mobile Ad Hoc Networks Energy-Efficient Real-Time Data Communications*. Springer, 2006.
- [2] T. M. Cover, J. A. Thomas, *Elements of Information Theory*. John Wiley and Sons, 1991.
- [3] C. P. Robert and G. Casella, *Monte Carlo Statistical Methods*. Springer-Verlag, 2004.
- [4] A. V. Lima-e-Lima, C. E. B. Cruz Pimentel, R. M. de Moraes, "Interference Modeling for Wireless Ad Hoc Networks." In *Christos J. Bouras (Org.), Trends in Telecommunications Technologies*, pp. 185-199. INTECH, 2010.
- [5] P. Gupta and P. R. Kumar, "The capacity of wireless networks." *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 46, no. 2, pp. 388-404, March 2000.
- [6] M. Grossglauser and D. Tse, "Mobility increases the capacity of wireless ad hoc networks." In *Proc. of IEEE INFOCOM*, Anchorage, Alaska, March 2001.
- [7] C. T. Lau and C. Leung, "Capture models for mobile packet radio networks." *IEEE Transactions on Communications*, vol. 40, no. 5, pp. 917-925, May 1992.
- [8] F. Baccelli and B. Błaszczyszyn, "On a Coverage Range Process Ranging from the Boolean Model to The Poisson Voroni Tessellation with Applications to Wireless Communications." *Adv. Appl. Prob.*, vol. 33, no. 2, pp. 293-323, 2001.
- [9] O. Dousse, F. Baccelli and P. Thiran, "Impact of Interferences on Connectivity in Ad Hoc Networks". In *Proc. of IEEE INFOCOM*, San Francisco, CA, USA, April 2003.
- [10] O. Arpacioğlu and Z. J. Haas, "On the Scalability and Capacity of Wireless Networks with Omnidirectional Antennas." In *Proc. of IEEE/ACM IPSN*, Berkeley, CA, USA, April 2004.
- [11] R. G. Akl, M. V. Hegde, M. Naraghi-Pour and P. S. Min, "Multicell CDMA Network Design." *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 50, no. 3, May 2001.
- [12] "GSL - GNU scientific library," <http://www.gnu.org/software/gsl/>, acesso em 20/04/2011.