

Análise da Taxa de Erro de Bit em Redes *Ad Hoc* ALOHA de Múltiplos Saltos

Pabblo Cardelino Ghobad e Renato Mariz de Moraes

Resumo— Este artigo investiga redes *ad hoc* ALOHA sem fio de múltiplos saltos avaliando seu desempenho de taxa de erro de bit. Foi proposta uma alteração no modelo de propagação do canal de comunicação que permite sua aplicação para qualquer densidade de nós na rede com topologia randômica. Foi também verificado que o aumento da potência de transmissão em redes densas não melhora o desempenho em termos de taxa de erro de bit e tem importância para estudos de redes de sensores onde redução de consumo de energia está associada à potência de transmissão.

Palavras-Chave— ALOHA, BER, Redes *ad hoc*.

Abstract— This paper investigates multi-hop wireless ALOHA *ad hoc* networks evaluating their Bit Error Rate (BER). It is proposed an alteration of the propagation channel model which allows its application to any node density with random network topology. It was also verified that the increasing in transmission power in dense networks does not improve the BER performance and it has importance to sensor networks studies in which power reduction is associated to transmission power.

Keywords— *Ad hoc* networks, ALOHA, BER.

I. INTRODUÇÃO

Redes *ad hoc* sem fio são caracterizadas principalmente por não contar com nenhum tipo de infraestrutura. São versáteis e capazes de estabelecer comunicação entre diversos nós, seja utilizando um único salto ou múltiplos saltos para enviar dados a um destino, sem depender de um controle central para gerenciar os componentes da rede [1]. Roteamento, sinalização e todas as outras funcionalidades que a rede deve prover são distribuídas entre os próprios nós de forma que com a cooperação, o sistema como um todo não dependa crucialmente de um único nó, podendo se reestruturar em caso de falhas de nós, quebras de enlaces, mobilidade, *etc.* Essas redes podem ser utilizadas em diversos casos, como no monitoramento de atividades sísmicas, em campos de batalhas, situações de resgate, perseguições policiais ou qualquer aplicação que prescindia de infraestrutura para comunicação.

Este artigo procurou analisar o desempenho de transmissão fim a fim em uma rede *ad hoc* na qual os nós encontram-se dispostos numa superfície plana, segundo uma distribuição uniforme aleatória e utilizam o protocolo ALOHA [2] de camada de controle de múltiplo acesso ao meio (MAC, do inglês *Medium Access Control*) empregando um modelo do canal de propagação que pode ser aplicado a qualquer densidade de nós na rede. Foi apresentado o desenvolvimento do cálculo da relação sinal-ruído-e-interferência (SNIR, do inglês *Signal to Noise and Interference Ratio*) e em seguida foi obtida a taxa de erro de bit (BER, do inglês *Bit Error Rate*) a fim de verificar o desempenho desta rede em função de

importantes parâmetros como a densidade dos nós e a potência de transmissão.

O protocolo ALOHA de camada MAC foi escolhido por ser de simples modelagem e totalmente descentralizado. Trabalhos futuros podem estender a análise que trata este artigo para outros tipos de protocolos de camada MAC.

Comparando os resultados aqui obtidos com os de trabalhos relacionados [3], [4], foram encontradas diferenças em termos de ordem de grandeza de BER que podem chegar a cinco vezes dependendo dos parâmetros empregados e que confirmam que o modelo aqui proposto para descrever o canal de comunicação está mais adequado às redes *ad hoc* práticas com alta densidade de nós. Foi verificado também que o aumento da potência de transmissão não melhora a BER para redes densas.

O restante deste artigo está organizado da seguinte forma. A Seção II descreve os trabalhos relacionados. A Seção III mostra a alteração no modelo de propagação, bem como o desenvolvimento das novas fórmulas. Os resultados são descritos e discutidos na Seção IV e a Seção V conclui o artigo.

II. TRABALHOS RELACIONADOS

Os estudos de desempenho de camadas superiores em redes *ad hoc* sem fio, mais precisamente na camada de rede, transporte ou aplicação assumem pouca influência da camada física (PHY, do inglês *physical*) podendo, portanto, resultar em análises não realistas. Uma das medidas de desempenho da camada física de forte influência nos meios de comunicação, principalmente sem fio, é a taxa de erro de bit [5]. Em [3] e [4], Tonguz *et al.* desenvolveram uma metodologia para determinar a BER experimentada numa comunicação fim a fim no contexto de uma rede *ad hoc* ALOHA de múltiplos saltos. Os autores compararam os resultados obtidos para a topologia randômica com outra análise feita para topologia uniforme em grade. Naquele trabalho foi empregado o modelo de canal de comunicação que é apropriado ao estudo de redes de telefonia celular, chamado modelo de Friis de perda no espaço livre [5].

A seguir será apresentado resumidamente o modelo empregado em [3] e [4] para o cálculo da BER considerando o modelo de Friis para o canal de comunicação onde o protocolo de camada MAC empregado foi o ALOHA.

A. Premissas

Assume-se primeiramente que os nós estão dispostos numa superfície plana quadrada de lado $2R$, segundo uma distribuição uniforme de probabilidade. Para simplificar a análise, considera-se que o sinal transmitido será afetado apenas pela perda por propagação no espaço livre. Logo, a potência do sinal recebido para o salto (ou enlace) que separa transmissor e receptor é, segundo a fórmula de Friis [5]:

$$P_{r_L} = \frac{G_t G_r c^2 P_t}{(4\pi)^2 f_c^2 r_L^2}, \quad (1)$$

onde P_t é a potência transmitida, G_t e G_r são os ganhos de transmissão e recepção das antenas, respectivamente, f_c é a frequência da portadora e c é a velocidade da luz no vácuo, e r_L é a distância do enlace.

São consideradas duas fontes de ruído: o ruído térmico de potência $P_{thermal}$ e a interferência entre nós de potência P_{INT} . Considerando a transmissão com sinalização BPSK (do inglês, *Binary Phase Shift Keying*), a BER num enlace é dada por:

$$BER_L = Q(\sqrt{2SNIR_L}) = Q\left(\sqrt{\frac{2P_t G_t G_r (c/4\pi f_c)^2}{W^2 (P_{thermal} + P_{INT}^{total})}}\right), \quad (2)$$

onde $Q(x) = \int_x^\infty \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-u^2/2} du$, W é uma variável aleatória que representa a distância do salto, e P_{INT}^{total} representa a potência de interferência total percebida por um nó, causada pelos demais transmissores na rede. Para que não seja necessário calcular uma potência de interferência total para cada um dos possíveis nós receptores da rede, assume-se que os mesmos estão dispostos sobre a superfície de um *torus*. Assim, pode-se assumir invariância espacial fazendo com que todos os nós na rede experimentem uma mesma interferência média $E[P_{INT}^{total}]$.

Assume-se que os enlaces em uma rota são independentes, e que os erros ocorridos em cada salto são acumulados até que o destino seja alcançado. Desta forma, a taxa de erro no fim de uma rota é obtida por:

$$BER_R = 1 - \prod_{i=1}^{\bar{n}_h} (1 - BER_{L_i}), \quad (3)$$

sendo BER_{L_i} a taxa de erro no i -ésimo salto de uma rota e \bar{n}_h o número médio de saltos na rota.

A potência do ruído térmico pode ser escrita como $P_{thermal} = FkT_oB$, onde F é a figura do ruído, B é a banda de transmissão em Hertz (Hz), k é a constante de Boltzmann e $T_o = 300$ Kelvins é a temperatura ambiente. Para encontrar a BER_R resta determinar a distribuição da distância entre os saltos (distribuição de W), o número médio de saltos (\bar{n}_h) e a potência total de interferência média ($E[P_{INT}^{total}]$).

A distância entre dois nós num salto está fortemente relacionada com a estratégia de roteamento adotada. O esquema de roteamento pode ser criado buscando o menor número de saltos, maior economia de energia ou outra estratégia benéfica. Nesta análise empregou-se que a rota seja selecionada criando saltos individuais de menor comprimento possível, sempre em direção ao destino no intuito de reduzir a BER fim a fim. A Fig. 1 ilustra essa situação. Uma reta é criada entre a fonte e o nó de destino, funcionando como um referencial, para que as transmissões não desviem dessa direção mais do que um determinado ângulo θ . Assim, quanto maior for o ângulo, mais a rota real irá desviar da rota referencial e menores serão os tamanhos de cada salto. No caso de θ ser menor, a rota real irá se tornar mais próxima da rota de referência, mas os saltos se tornarão maiores.

Considerando essa estratégia de roteamento, pode-se mostrar que a função densidade de probabilidade cumulativa (FDC) para a variável aleatória W é descrita por [4]:

$$F_W(w) = 1 - e^{-\rho_s \frac{\theta}{2} w^2}, \quad (4)$$

onde $\rho_s = \frac{N}{A}$ é a densidade espacial da rede em unidades de nó/m², sendo N o número total de nós e A a área da rede.

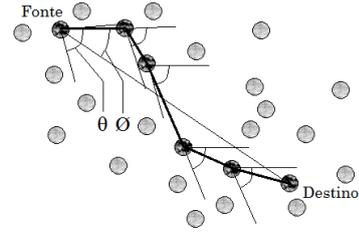


Fig. 1. Características do roteamento: W é a distância (salto) entre dois nós que se comunicam ao longo da rota, θ o ângulo máximo de desvio e O o ângulo real de desvio da rota em relação à reta que liga a fonte ao destino.

Por outro lado, o número médio de saltos numa rota deve ser inversamente proporcional ao tamanho médio dos saltos na mesma. Quanto maior o tamanho do salto, menor a quantidade total de saltos, e vice-versa. Quando a estratégia de roteamento utilizada é a que foi descrita anteriormente, pode-se projetar cada um dos saltos em direção à reta de referência, e aproximar o número médio de saltos como sendo [4]:

$$\bar{n}_h \approx \frac{R}{3} [\sqrt{2} + \ln(1 + \sqrt{2})] \left(\sqrt{\frac{\pi}{2\rho_s \theta}} \sin \frac{\theta}{2} \right)^{-1}. \quad (5)$$

Como o meio de comunicação via rádio é compartilhado entre todos os nós da rede, existe a possibilidade de que dois ou mais nós tentem transmitir ao mesmo tempo, causando interferências uns nos outros. A potência de interferência média $E[P_{INT}^{(i)}]$ causada por um único nó que esteja transmitindo concorrentemente com outro pode ser calculada pela fórmula de Friis (ver Eq. (1)). Mas devido à topologia randômica, a distância (r_L) entre os nós é aleatória, e dessa forma, é substituída por uma variável aleatória Z , assim:

$$E[P_{INT}^{(i)}] = \frac{G_t G_r P_t c^2}{(4\pi)^2 f_c^2} E\left[\frac{1}{Z^2}\right]. \quad (6)$$

Faz-se necessário agora conhecer a função densidade de probabilidade da variável aleatória Z . Tonguz *et al.* [4] mostram que ela é dada por:

$$f_Z(z) = \begin{cases} \frac{\pi z}{2R^2} & 0 \leq z < R \\ \frac{\pi z}{2R^2} - \frac{2z \cos^{-1}(R/z)}{R^2} & R \leq z < \sqrt{2}R. \end{cases} \quad (7)$$

Devido à fórmula de Friis ter sua aplicação limitada à região de campo distante [5], os autores em [3] e [4] assumem que, quando um nó está gerando interferência a uma distância menor do que uma referência próxima (d_0), a potência de interferência recebida é igual à potência transmitida, multiplicada pelo fator de ganho $\frac{G_t G_r c^2}{(4\pi)^2 f_c^2}$. Pode-se mostrar que a potência média de interferência causada por um único nó concorrente é [4]:

$$E[P_{INT}^{(i)}] \approx \frac{G_t G_r P_t c^2}{(4\pi)^2 f_c^2} \left[\frac{\pi d_0^2}{4R^2} + \frac{\pi \ln(R/d_0)}{2R^2} + \frac{\pi \ln(\sqrt{2})}{2R^2} - \frac{0.37157}{R^2} \right]. \quad (8)$$

Numa rede real, a probabilidade de um nó estar transmitindo concorrentemente com outra comunicação está fortemente atrelada ao protocolo utilizado na camada MAC. Para o caso de um protocolo ALOHA sem retransmissão, a interferência média total experimentada por um nó na rede pode ser escrita como [3], [4]:

$$E[P_{INT}^{total}] = \left(1 - e^{-\frac{\lambda L}{R_b}}\right) \sum_{i=1}^{N-2} E[P_{INT}^{(i)}], \quad (9)$$

onde λ é a taxa média de transmissão de pacotes por um nó em pacotes por segundo (conforme uma distribuição de Poisson), L é o tamanho do pacote em bits, R_b é a taxa de transmissão de

dados em bits/s e $P_{INT}^{(i)}$ é a potência de interferência gerada pelo nó i . O fator $1 - e^{-\lambda L/R_b}$ corresponde à probabilidade de um determinado nó causar interferência em outra transmissão, independentemente de sua localização.

O resultado final pode ser encontrado fazendo-se diversas realizações da variável aleatória W , calculando a taxa de erro de bits em toda a rota (BER_R), e por fim obtendo uma média entre diversas BER_R encontradas.

Entretanto, em redes *ad hoc* e de sensores onde a densidade de nós pode ser elevada, isto é, nos casos em que transmissor e receptor possam estar muito próximos, este modelo precisa ser alterado para evitar que a potência recebida seja inapropriadamente avaliada. A próxima seção estende a análise feita para a topologia randômica, alterando o modelo de Friis a fim de considerar redes *ad hoc* densas.

III. MODELO MODIFICADO E DESENVOLVIMENTO

O objetivo principal na modificação do modelo apresentado na seção anterior é encontrar para o desempenho de tais redes resultados que se aproximem mais da realidade para redes *ad hoc* e de sensores. Além disso, a solução proposta aqui tornará o modelo mais genérico e universal, de forma que possa ser aplicado sem restrições e livre da escolha cuidadosa da distância de referência d_0 . Essa melhoria no modelo é consequência da adaptação da fórmula de Friis e pode ser amplamente utilizada para o caso de redes *ad hoc* sem fio.

Como explicado anteriormente, a fórmula de Friis só pode ser aplicada para regiões de campo distante. Assumir uma distância de referência d_0 para auxiliar o cálculo de perdas de propagação é uma prática muito comum [5]. Mas, apesar de se aplicar bem para outros tipos de rede, como as celulares, sua aplicação direta para redes *ad hoc* precisa ser feita com cuidado. Isso porque a distância de referência deve ser escolhida de forma tal que dois nós no sistema de comunicação não se encontrem mais próximos do que d_0 . Em redes *ad hoc*, não é possível prever a disposição dos nós, e por isso, assumir tal premissa seria introduzir erros no modelo. Conforme a densidade de nós na rede aumenta ou diminua, alterando consequentemente a distância média entre os nós, o modelo desenvolvido em [3] e [4] pode se tornar mais ou menos realista, mas nunca sendo válido para todas as densidades.

Para ilustrar a situação, cabe dizer: assumir a aproximação proposta na Seção II significa assumir que, sempre que determinado nó transmitir, todos os outros nós que se encontram a uma distância menor que d_0 do transmissor receberão exatamente a potência total transmitida multiplicada pelos ganhos, independentemente de estarem mais próximos ou não do transmissor. Em outras palavras, não poderá existir nós num raio de d_0 metros (m) partindo do transmissor. Os demais nós somente podem estar dispostos: ou além de d_0 , ou com as antenas encostadas no transmissor, mas nunca a uma distância maior que zero e menor que d_0 .

A adaptação na fórmula de Friis consiste em trocar a variável que descreve a distância entre quem transmite e quem recebe o sinal, de r_L para $r_L + 1$, e foi sugerida por autores que investigaram a escalabilidade de redes *ad hoc* [6], [7], [8]. Assim a fórmula adaptada resulta:

$$P_{r_L+1} = \frac{G_t G_r c^2 P_t}{(4\pi)^2 f_c^2 (r_L+1)^2} \quad (10)$$

Para justificar o uso de tal modelo, podemos fazer a seguinte comparação. Primeiro, supondo que a distância entre os nós transmissor e receptor seja muito grande, tendendo a infinito, têm-se:

$$\lim_{r_L \rightarrow \infty} P_{r_L+1} = \lim_{r_L \rightarrow \infty} \frac{G_t G_r c^2 P_t}{(4\pi)^2 f_c^2 (r_L+1)^2} = 0 \quad (11)$$

e

$$\lim_{r_L \rightarrow \infty} P_{r_L} = \lim_{r_L \rightarrow \infty} \frac{G_t G_r c^2 P_t}{(4\pi)^2 f_c^2 r_L^2} = 0. \quad (12)$$

Em segundo lugar, quando os dois nós se localizarem muito próximos um do outro, fazendo com que a distância entre eles tenda a zero, têm-se:

$$\lim_{r_L \rightarrow 0} P_{r_L+1} = \frac{G_t G_r c^2 P_t}{(4\pi)^2 f_c^2} \quad (13)$$

e

$$\lim_{r_L \rightarrow 0} P_{r_L} = \lim_{r_L \rightarrow 0} \frac{G_t G_r c^2 P_t}{(4\pi)^2 f_c^2 r_L^2} = \infty. \quad (14)$$

Ou seja, quando a distância entre os nós é suficientemente grande, as duas fórmulas são equivalentes. Mas, na situação em que a distância que separa os dois nós se torna pequena, tendendo a zero, a fórmula original diverge, fazendo com que a potência recebida tenda a infinito, enquanto a fórmula modificada converge, igualando a potência recebida à transmitida multiplicada por um fator devido ao ganho das antenas. Afinal, não se pode receber mais potência do que foi transmitida. Essa adaptação permite a aplicação da fórmula modificada em outras regiões que não necessariamente a de campo distante e principalmente em redes densas, casos em que r_L pode tender a zero.

Dando continuidade ao uso do modelo adaptado, a contribuição média de potência de interferência proveniente de um único nó, deve ser agora regida pela equação:

$$E^*[P_{INT}^{(i)}] = \frac{G_t G_r P_t c^2}{(4\pi)^2 f_c^2} E \left[\frac{1}{(Z+1)^2} \right], \quad (15)$$

sendo Z novamente a variável aleatória que representa a distância entre um nó gerador de interferência e o receptor. Utilizando a mesma função densidade de probabilidade descrita na Eq. (7) para Z , a potência média de interferência gerada por um nó transmissor é descrita por:

$$E^*[P_{INT}^{(i)}] = \frac{G_t G_r P_t c^2}{(4\pi)^2 f_c^2} \left\{ \frac{\pi}{2R^2} \left[\frac{1}{1+R\sqrt{2}} + \ln(1+R\sqrt{2}) - 1 \right] - \frac{2}{R^2} \int_R^{R\sqrt{2}} \frac{z}{(1+z)^2} \cos^{-1}(R/z) dz \right\}, \quad (16)$$

cujas demonstração encontra-se no Apêndice A.

Para calcular a potência total média percebida por cada nó receptor, mantém-se a fórmula utilizada no modelo anterior (Eq. (9)), porém empregando a interferência gerada por cada transmissor obtida da Eq. (16), resultando para o caso do protocolo ALOHA sem retransmissão:

$$E^*[P_{INT}^{total}] = \left(1 - e^{-\frac{\lambda L}{R_b}} \right) \sum_{i=1}^{N-2} E^*[P_{INT}^{(i)}]. \quad (17)$$

Assim como o modelo adaptado é utilizado para calcular a potência média de interferência, faz-se necessário aplicá-lo também à transmissão da informação entre os nós que compõem a rota. Dessa forma, para cada enlace tem-se:

$$BER_{L_i}^* = Q \left(\sqrt{\frac{2P_t G_t G_r (c/4\pi f_c)^2}{(W+1)^2 (P_{thermal} + E^*[P_{INT}^{total}])}} \right), \quad (18)$$

e substituindo este resultado na Eq. (3) obtém-se a BER na rota para o modelo adaptado.

IV. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados apresentados nesta seção foram obtidos através de várias realizações da variável aleatória W , segundo a FDC dada pela Eq. (4), calculando-se a taxa de erro de bits em toda a rota para cada caso, e por fim extraindo-se uma média sobre 10.000 BER_R .

Para todas as figuras apresentadas, os resultados são obtidos em função da densidade de nós na rede onde o número total de nós é $N = 1000$ e variou-se a área da rede. A potência de transmissão é $P_t = 1 \mu W$, a taxa de transmissão de dados é $R_b = 1 Mbps$, a banda de transmissão tem largura $B = 1 MHz$, os ganhos de recepção e transmissão são iguais a um ($G_r = G_t = 1$), a distância de referência para o modelo original é $d_0 = 1 m$, a frequência da portadora é $f_c = 2,4 GHz$, o comprimento do pacote é $L = 1000 bits$ e a taxa média de transmissão é $\lambda = 1 pacote/segundo$. Quando outros valores forem utilizados, os mesmos serão especificados.

Na Fig. 2 estão sendo comparados os resultados obtidos em [4] e os do modelo modificado proposto nesse artigo. Para cada um dos modelos foram simulados três cenários diferentes correspondentes aos valores de $\theta = \pi$, $\theta = \pi/2$ e $\theta = \pi/10$.

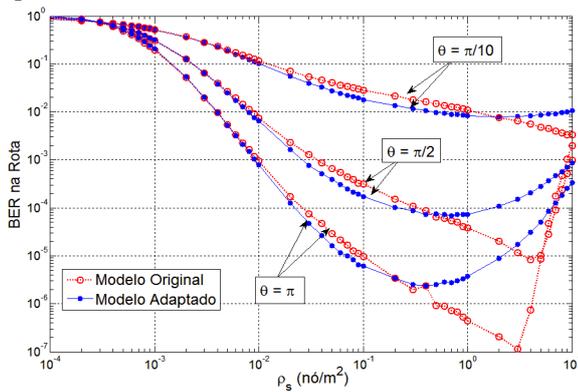


Fig. 2. BER na rota em função da densidade de nós. Comparação entre o modelo original e o modelo adaptado para três valores diferentes do ângulo teta ($\theta = \pi$, $\theta = \pi/2$ e $\theta = \pi/10$).

Observa-se que a BER da rota vai diminuindo com o aumento da densidade até um ponto em que a interferência total é maior que a potência recebida fazendo com que a BER passe a aumentar. Nota-se que a análise feita em [4] funciona num primeiro momento, como um limite superior para as taxas de erro na rota. Conforme a densidade da rede aumenta, esse limite superior superestima a potência recebida no nó integrante da rota. Dessa forma, com a potência recebida muito maior do que as interferências, a BER vai para valores muito baixos, e também, muito distantes da realidade. Após determinada densidade limite (por volta de $1 \text{ nód}/m^2$), as distâncias entre os nós se tornam ou comparável ou em sua maioria menores do que $d_0 = 1 m$, e nesse ponto em diante, o modelo original praticamente deixa de ser válido. E é exatamente a partir deste ponto que os dois modelos começam a divergir fortemente, já que a estimativa da potência recebida não representa mais a realidade no modelo original proposto em [4], enquanto que o modelo modificado comporta-se apropriadamente.

Resultados análogos aos da Fig. 2 foram observados para o caso em que o expoente de perda do caminho é igual a 4.

Entretanto, devido à limitação de espaço deste artigo não foi possível apresentar as equações e as figuras para este caso.

Feita essa análise particular para o caso onde $d_0 = 1 m$, cabe ilustrar o que o modelo proposto em [4] estimaria para outros valores da distância de referência. Três curvas estão mostradas na Fig. 3, utilizando o modelo anterior com valores de $d_0 = 1 m$, $d_0 = 10 m$ e $d_0 = 100 m$. A figura é importante para mostrar como o modelo deixa de funcionar quando a densidade implica em distâncias médias entre os nós menores do que d_0 . As curvas são todas realizadas para o caso onde $\theta = \pi/2$ e comparadas com a curva correspondente do modelo adaptado. A curva com $d_0 = 100 m$ se mostra válida até uma densidade de aproximadamente $5 \cdot 10^{-4} \text{ nód}/m^2$. Com $d_0 = 10 m$, os valores são coerentes até por volta de $10^{-3} \text{ nód}/m^2$. A situação em que o modelo anterior mais se aproxima do adaptado é para $d_0 = 1 m$ e ainda assim não se mostra muito realista para densidades acima de $1 \text{ nód}/m^2$. Note que d_0 não deve ser menor que $1 m$ para a faixa de frequência de $2 GHz$ [5].

Situações em que a densidade de usuários seja de $1 \text{ nód}/m^2$ ou até maiores podem ser facilmente encontradas na realidade, por exemplo, em grandes eventos como shows, jogos de futebol, conferências, etc., ou até mesmo em feiras ou *shopping centers* lotados.

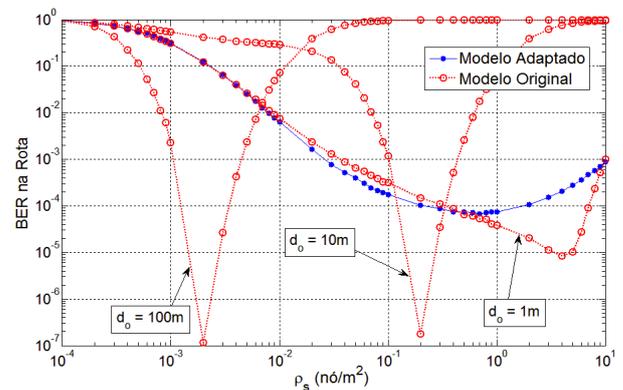


Fig. 3. BER na rota em função da densidade de nós. Comparação entre os modelos original e adaptado com três valores diferentes da distância de referência d_0 ($1 m$, $10 m$ e $100 m$) para $\theta = \pi/2$.

A Fig. 4 compara os dois modelos para potências de transmissão distintas, $1 mW$ e $1 \mu W$. Observa-se que para densidades menores que $10^{-1} \text{ nód}/m^2$, transmitir com maior potência diminui a BER da rota. Entretanto, se a densidade for maior que $1 \text{ nód}/m^2$, aumentar a potência de transmissão não melhora o desempenho em termos de BER já que as curvas, em cada modelo, ficam praticamente sobrepostas. Isto se explica pelo fato de que quando a densidade dos nós na rede for alta a interferência torna-se dominante resultando inútil o aumento da potência de transmissão. Essa observação é bastante relevante nos casos em que o consumo de energia reduzido é crucial, como por exemplo, em redes de sensores. Sabendo-se desta informação, é importante considerar os casos em que transmitir em baixa potência reduzirá o consumo de energia em sistemas que operam a bateria sem alterar significativamente a taxa de erro de bit.

Da Fig. 4 também se observa que os dois modelos apresentam mais diferenças para maior potência de transmissão, *i.e.* $P_t = 1 mW$, onde desde $10^{-4} \text{ nód}/m^2$ até $10^{-1} \text{ nód}/m^2$ a diferença de BER é de aproximadamente cinco vezes,

pois o aumento de potência piora a aproximação no modelo anterior já que o efeito da interferência sobreestimada para os nós a uma distancia menor que d_0 do receptor tende a dominar a SNIR.

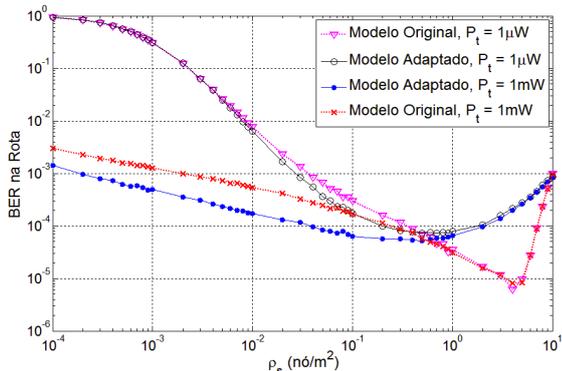


Fig. 4. BER na rota em função da densidade de nós. Comparação entre o modelo modificado e o modelo original com dois valores de potência de transmissão P_t (1 μ W e 1 mW) para $\theta = \pi/2$.

Na Fig. 5 as curvas representam os modelos, original e adaptado, com taxas de transmissão e potência alteradas. A modificação da taxa de transmissão é obtida aumentando-se a banda de transmissão do canal [4]. Especificamente, a taxa de transmissão foi aumentada para 11 Mbps, mas em apenas duas curvas, a potência de transmissão também foi aumentada (passando de 1 μ W para 1 mW). Observa-se que aumentar a banda de transmissão nem sempre irá melhorar a comunicação já que mais ruído será captado pelo receptor, como normalmente esperado. Esse aumento da taxa, sem o correspondente aumento da potência, faz com que o ruído térmico influencie muito na SNIR, tornando as taxas de erro muito elevadas. Porém, quando a potência é aumentada, o ganho na qualidade da comunicação fica evidente.

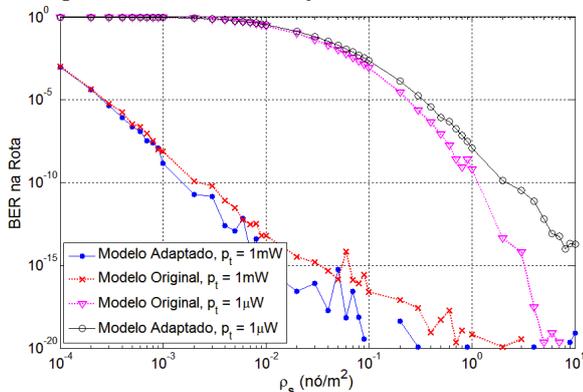


Fig. 5. BER na rota em função da densidade de nós. Comparação entre o modelo modificado e o modelo original com valores distintos de potência de transmissão para $\theta = \pi/2$ e $R_b = 11$ Mbps.

Ainda na Fig.5, nota-se grande diminuição da BER, mesmo para densidades muito elevadas. Isso se dá, pois com a taxa de transmissão elevada, o tempo de transmissão de cada pacote diminui, reduzindo a quantidade de colisões no meio de comunicação compartilhado.

V. CONCLUSÕES

Neste artigo foi desenvolvido um modelo modificado para calcular taxas de erro de bit (BER) ao fim de uma rota numa rede *ad hoc* ALOHA de múltiplos saltos com topologia

randômica. A alteração do modelo visou dispensar uma aproximação em função da distância de referência adaptando a fórmula de Friis para permitir que a potência recebida por um nó muito próximo ao transmissor não seja maior que a transmitida. O modelo modificado permitiu que a análise do desempenho da BER se tornasse mais fiel à realidade, principalmente em redes densas. Outra conclusão importante foi observar que em redes *ad hoc* densas o aumento da potência de transmissão não melhora a BER indicando que é possível economizar energia transmitindo em baixa potência sem comprometer o desempenho da rede.

REFERÊNCIAS

- [1] C. S. R. Murthy and B. S. Manoj, *Ad Hoc Wireless Networks: Architectures and Protocols*, Prentice Hall, 2006
- [2] N. Abramson, "The ALOHA System: Another Alternative for Computer Communications". In *Proc. of Fall Joint Computer Conference*, Houston, TX, USA, Nov. 1970.
- [3] O. K. Tonguz and G. Ferrari, *Ad Hoc Wireless Networks: A Communication-Theoretic Perspective*. John Wiley & Sons, 2006.
- [4] S. Panichpapiboon, G. Ferrari and O. K. Tonguz, "Sensor Networks with Random Versus Uniform Topology: MAC and Interference Considerations". In *Proc. of IEEE VTC*, Milan, Italy, May 2004.
- [5] T. S. Rappaport, *Wireless Communications: Principles and Practice*, Prentice-Hall, 2002.
- [6] F. Baccelli and B. Blaszczyszyn, "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 (2), pp. 293–323, 2001.
- [7] 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.
- [8] O. Arpaciglu 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.

APÊNDICE

A. Demonstração da Eq. (16)

Para encontrar a potência média de interferência causada por um único nó, é necessário dispor da função densidade de probabilidade da distância (Z) entre os nós, e também de uma fórmula que determine a potência recebida numa determinada transmissão. Neste caso será a fórmula de Friis adaptada. Sabendo que a densidade de probabilidade de Z é dada pela Eq. (7), e empregando a Eq. (15), a média da potência de interferência é obtida por:

$$E^*[P_{INT}^{(i)}] = \frac{G_t G_r P_t c^2}{(4\pi)^2 f_c^2} \left\{ \int_0^R \frac{\pi z}{2R^2(z+1)^2} dz + \int_R^{R\sqrt{2}} \left(\frac{\pi z}{2R^2(z+1)^2} - \frac{2z \cos^{-1}(R/z)}{R^2(1+z)^2} \right) dz \right\}$$

$$= \frac{G_t G_r P_t c^2}{(4\pi)^2 f_c^2} \left\{ \int_0^{R\sqrt{2}} \frac{\pi z}{2R^2(z+1)^2} dz - \int_R^{R\sqrt{2}} \frac{2z \cos^{-1}(R/z)}{R^2(1+z)^2} dz \right\}.$$

A primeira integral pode ser resolvida com a seguinte fórmula:

$$\int \frac{u du}{(a + bu)^2} = \frac{a}{b^2(a + bu)} + \frac{1}{b^2} \ln|a + bu| + C.$$

Para a segunda integral não foi encontrada fórmula fechada. O resultado final para a potência média de interferência causada por um único nó é então:

$$E^*[P_{INT}^{(i)}] = \frac{G_t G_r P_t c^2}{(4\pi)^2 f_c^2} \left\{ \frac{\pi}{2R^2} \left[\frac{1}{1+R\sqrt{2}} \ln(1 + R\sqrt{2}) - 1 \right] - \frac{2}{R^2} \int_R^{R\sqrt{2}} \frac{z}{(1+z)^2} \cos^{-1}(R/z) dz \right\} \quad \text{CQD.}$$