

Modelagem e Avaliação de Desempenho de Redes Ad Hoc Sem Fio

Renata Rampim de Freitas Dias^(†) e Paulo Cardieri^(‡)

(†) Faculdade de Engenharia de Sorocaba, Sorocaba - SP, (‡) FEEC - UNICAMP, Campinas - SP

Resumo— Este artigo apresenta um modelo analítico para uma rede ad hoc sem fio empregando a técnica de acesso TDMA espacial. Com base no modelo desenvolvido, o desempenho da rede é analisado, com atenção especial aos efeitos da robustez da modulação e do canal de propagação na vazão e no atraso de pacotes. Os resultados mostram que, dependendo dos parâmetros da rede, o desempenho da rede pode ser limitada pela interferência (excessiva perda de pacotes), ou pelo atraso.

Palavras-Chave— Rede sem fio ad hoc, TDMA, análise de desempenho de redes sem fio.

Abstract— This paper presents an analytical model for wireless ad hoc network employing spatial TDMA. Based on the presented model, the performance of an ad hoc multihop wireless network is analyzed, with special attention paid to the effects of robustness of modulation and channel path loss attenuation on throughput and packet delay. The results show that, depending on several network parameters, the performance can be limited by interference (severe packet loss) or delay.

Keywords— Wireless ad hoc networks, TDMA, performance analysis of wireless networks.

I. INTRODUÇÃO

Uma rede ad hoc sem fio é uma rede na qual as estações se comunicam diretamente umas com as outras, sem o auxílio de uma estrutura fixa ou de uma administração centralizada. Duas estações que não estiverem ao alcance uma da outra podem ainda assim se comunicar entre si, usando seus vizinhos para formar um enlace de múltiplos saltos (*multihop*). Em redes ad hoc o reuso do canal por enlaces convenientemente separados é permitido, visando aumentar a capacidade da rede, mas às custas do aparecimento da interferência co-canal como um dos principais fatores de degradação do desempenho da rede.

As redes ad hoc sem fio têm merecido grande atenção de pesquisadores desde a década de 70, o que tem levado a grandes avanços nesta área. No entanto, a estimação da capacidade de tais redes é ainda uma questão aberta e constitui uma área de pesquisa bastante ativa atualmente. Em particular, a análise da influência dos diversos aspectos da rede, como os da camada física e de enlace, na capacidade da rede é ainda objeto de investigação. Um exemplo de questão de interesse é aquela envolvendo a robustez da modulação e capacidade da rede. Esquemas de modulação eficientes elevam a vazão nos enlaces da rede. No entanto, tais esquemas têm baixa imunidade à interferência, exigindo um baixo fator de reuso

do canal pela rede, e levando a uma baixa taxa agregada de transmissão na rede e a um alto atraso.

O problema da estimação de capacidade de redes ad hoc é de difícil tratamento analítico, devido às características intrínsecas das redes ad hoc, como o caráter distribuídos de diversos mecanismos de controle de rede, como o controle de acesso e o roteamento, o caráter de *broadcasting* da comunicação sem fio e a aleatoriedade do comportamento dos usuários quanto ao tráfego e a mobilidade.

Não obstante as dificuldades mencionadas, diversos modelos para a estimação da capacidade de redes ad hoc têm sido propostos. Este trabalho apresenta um modelo para redes ad hoc *multihop* com topologia regular, que incorpora aspectos das camadas física e de enlace. O desempenho de uma rede ad hoc *multihop* é, então, analisado, com ênfase nos efeitos da modulação e distância de reuso na vazão e atraso. Os resultados mostram que, dependendo das condições de operação da rede, a sua capacidade pode ser limitada pelo *atraso* (ou seja, ao injetarmos mais pacotes na rede, o atraso tende a infinito antes que as perdas de pacotes atinjam níveis inaceitáveis) ou pela *interferência* (as perdas de pacotes são superiores a um valor máximo aceitável, mesmo com atraso finito). Assim, a contribuição deste artigo é a modelagem de uma rede ad hoc incorporando elementos das camadas física e de enlace, e a análise do seu desempenho, com a identificação destas duas forma de limitação da capacidade.

O restante do artigo está assim organizado: a Seção II traz uma breve descrição dos trabalhos relacionados, identificando a origem da modelagem usada aqui; a Seção III apresenta a modelagem da rede, resultando nas expressões para o atraso e vazão de pacotes; a Seção IV apresenta uma análise do desempenho de uma rede usando o modelo desenvolvido; por fim, a Seção V conclui o artigo.

II. TRABALHOS RELACIONADOS

Um dos primeiros trabalhos analíticos de modelagem de redes ad hoc foi o de Takagi e Kleinrock [1], no qual são propostos modelos para avaliar o desempenho de uma rede, com base na relação entre a probabilidade de sucesso de transmissão e a distância média do enlace transmissor-receptor. Subbarao e Hughes [2] aperfeiçoaram o modelo de Takagi e Kleinrock, incluindo os efeitos do sistema de transmissão, e propondo o conceito de *eficiência da informação*.

Neste presente trabalho consideremos o uso da técnica TDMA (*Time Division Multiple Access*). Um dos primeiros

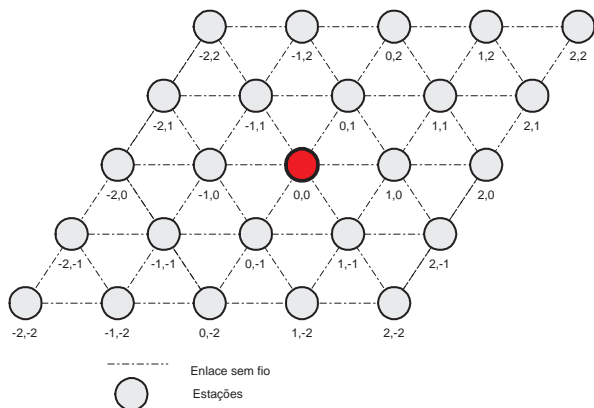


Fig. 1. Exemplo de grade regular triangular adotada na modelagem da rede ad hoc ($N = 25$ estações).

estudos sobre o uso de TDMA em redes ad hoc foi realizado por Nelson e Kleinrock [3]. Naquele trabalho, um mesmo *time-slot* era reutilizado por diferentes enlaces convenientemente espalhados na região da rede. Tal forma da técnica TDMA recebeu o nome *TDMA espacial*, e foi estudada por diversos outros pesquisadores, como, por exemplo, Shrader et al. e Gronkvist et al. [4]. Shrader et al. desenvolveram um modelo para rede ad hoc *multihop*, no qual cada estação é modelada como um sistema fila/servidor, cujo tráfego de entrada é a soma do *tráfego interno* (aquele gerado pelo próprio usuário da estação) e do *tráfego externo* (correspondente ao tráfego que está sendo encaminhado pela estação). Usando o *Princípio da Independência* proposto por Kleinrock [6], Shrader et al. aproximaram o processo de chegada de pacotes de cada estação por um processo poissoniano e modelaram as estações como filas do tipo M/D/1. No modelo aqui apresentado, segue-se a mesma estratégia adotada em [5], modelando-se as filas como M/D/1.

III. MODELAGEM DA REDE AD HOC SEM FIO

A modelagem apresentada neste trabalho visa a análise do desempenho da rede, medido por meio da vazão e do atraso de pacotes. Esta modelagem, portanto, considerará alguns aspectos da camada física e da camada de enlace.

A. Modelo do canal de propagação

O modelo de canal de propagação adotado para este trabalho é baseado na perda determinística por percurso da potência do sinal transmitido. Assim, a potência recebida P_r de um sinal transmitido por uma estação a uma distância d é $P_r = P_t d^{-\alpha}$, em que P_t é a potência do sinal transmitido e α é o expoente de perda de percurso [8]. Os efeitos de desvanecimento no canal não considerados neste modelo.

B. Topologia da rede

A rede modelada consiste em N estações (transmissor/receptor) posicionadas segundo uma grade triangular, com a distância entre as estações vizinhas igual a a , como ilustra a Figura 1. Cada estação da rede está associada a um gerador de

pacotes (p. ex., uma aplicação de usuário) que injeta pacotes na rede, e a um *sorvedouro* de pacotes. Os pacotes são gerados nas estações segundo um processo poissoniano, com taxa média de chegada igual a λ_m pacotes por segundo. As estações não podem transmitir e receber ao mesmo tempo. Assume-se que uma estação consegue transmitir apenas para os seus seis vizinhos imediatos, ou seja, a distância de separação entre transmissor e receptor é $d_{tx} = a$. Para eliminar o efeito borda e, assim, garantir que todas as estações tenham o mesmo comportamento quanto à interferência e ao tráfego, adotaremos um estrutura toroidal na modelagem desta rede, com a grade regular contendo número de linhas igual ao de colunas, como também exemplificado na Figura 1. Assim, $N = (2K + 1)^2$, com K sendo inteiro positivo.

As estações da rede acessam o canal rádio utilizando a técnica TDMA, supostamente regido por uma entidade controladora que conhece toda a rede e opera alguma técnica de escalonamento temporal. Os enlaces transmissor-receptor que estejam suficientemente distantes uns dos outros podem estar ativos simultaneamente, ou seja, podem usar simultaneamente o mesmo *time-slot*. Assim, denotando por N_{at} o número de estações que utilizam o mesmo *time-slot* simultaneamente, e supondo que cada estação utilize apenas um *time-slot* por quadro, então são necessários N/N_{at} *time-slots* por quadro para garantir que todas as estações transmitam em um *time-slot* de um quadro TDMA. Considerando que cada pacote tenha L_m bits e que a transmissão ocorra a uma taxa de R_b bits/s, então a duração do *time-slot* é $T_s = L_m/R_b$ e a do quadro é $T_q = (N/N_{at}) \times (L_m/R_b)$.

O escalonamento temporal das transmissões opera de tal forma a garantir que as estações que transmitem no mesmo *time-slot* estejam separadas uniformemente à uma *distância de reuso* normalizada $d_r = D_r/a$, em que D_r é a distância de reuso efetiva, sempre múltiplo de a . A rede é, portanto, dividida em grupos de N/d_r^2 estações, sendo que apenas uma estação de cada grupo transmite a cada *time-slot*. Como cada estação usa apenas um *time-slot*, segue que $N_{at} = N/d_r^2$. Porém, para garantir que as distâncias entre estações adjacentes sejam iguais, mesmo após a formação da estrutura toroidal, apenas valores ímpares de d_r são permitidos. Além disso, a razão N/d_r^2 deve ser inteira, o que impõe outra restrição aos valores possíveis de d_r . Tudo considerado, d_r deve ser ímpar e d_r^2 deve ser um fator de N .

Os pacotes gerados por uma dada estação (a uma taxa λ_m pacotes/s) tem como destino uma das $N - 1$ estações, com igual probabilidade de seleção, conforme também usado em [5]. Assim, a taxa de geração de pacotes por enlace fonte-destino é $\lambda_m/(N - 1)$. Caso a estação destino não seja uma das seis estações vizinhas, então um enlace de múltiplos saltos é formado, conectando a estação fonte à estação destino, aqui denominado *enlace fonte-destino*. A formação de enlaces fonte-destino segue o critério do menor número de saltos entre a fonte e o destino, e o mecanismo de roteamento associado não será discutido aqui. Considerando então a existência de enlaces de múltiplos saltos, a quantidade de pacotes por segundo λ_{est} que uma dada estação efetivamente transmite depende da taxa de geração de pacotes gerados localmente e do número de enlaces fonte-destino que passam por aquela

estação. Denotando o número médio de enlaces que passam por uma estação da rede por \bar{n}_r , temos, então,

$$\lambda_{est} = \frac{\lambda_m}{N-1} \bar{n}_r + \lambda_m. \quad (1)$$

A determinação do parâmetro da rede \bar{n}_r utiliza a formulação desenvolvida por Panichpapiboon et al. em [7], dada por

$$\bar{n}_r = \frac{4N}{(N-1)} \sum_{i=0}^K \sum_{j=1}^K \left\{ \frac{(i+j)!}{i! j!} \times \sum_{x=i}^K \sum_{y=j}^K \frac{(x+y-i-j)! x! y!}{(x+y)! (x-i)! (y-j)!} \right\}, \quad (2)$$

com $K = (\sqrt{N} - 1)/2$.

C. Modelo da camada física

As estações empregam modulação M-QAM, com largura de banda B Hz, e, portanto, taxa de transmissão de bits $R_b = B \log_2 M$. Além disso, assume-se que todas as estações transmitem com a mesma potência e que usam antenas omnidirecionais. Supondo que o ruído aditivo seja desprezível e que a interferência produzida pelos transmissores concomitantes siga uma distribuição Gaussiana, podemos aproximar a probabilidade de erro de bit por

$$P_b = 2 \left(1 - \frac{1}{\sqrt{M}} \right) \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{3}{2} \frac{\overline{SIR}}{(M-1)}} \right), \quad (3)$$

em que \overline{SIR} é o valor médio da relação sinal-interferência. Portanto, supondo erros independentes, a probabilidade de erro de pacote é $P_{pct} = 1 - (1 - P_b)^{L_m}$.

Devido à estrutura toroidal da rede e à distribuição uniforme das estações destinos, todas as estações observarão o mesmo nível médio de interferência. Assim, é suficiente a determinação do valor médio \overline{SIR} na estação localizada no centro da rede. O valor de SIR medido em um receptor depende dos seguintes fatores: (i) número de estações ativas concomitantemente N_{at} ; (ii) probabilidade p_{at} de uma estação estar ativa (interferente), ou seja, probabilidade de haver pacotes na fila de um transmissor (uma expressão para p_{at} será vista mais adiante); (iii) distância de separação entre transmissor e receptor d_{tr} ; (iv) distância entre estações ativas concomitantes d_r ; e (v) expoente de perda de percurso α . A determinação analítica de \overline{SIR} por meio de uma formulação estatística mostrou-se complexa, de forma que optamos pela determinação da função $\overline{SIR} = f(N_{at}, p_{at}, d_{tr}, d_r, \alpha)$ por meio de ajuste de curvas com base em valores de \overline{SIR} estimados por meio de simulação. Mais informações sobre este ajuste de curvas podem ser encontrados em [9].

D. Medidas de desempenho

O desempenho da rede será medido por meio da *vazão* e do *atraso* de pacotes, ambos medidos em um enlace transmissor-receptor. Para a análise da *vazão*, utilizamos como medida a quantidade de pacotes que saem de um transmissor e chegam

corretamente a um receptor, por intervalo de quadro. Esta medida, que denominaremos *vazão efetiva* η , é calculada por

$$\eta = \lambda_{est} T_q (1 - P_{pct}), \quad (4)$$

em que λ_{est} é a quantidade de pacotes por segundo que saem de um transmissor (dado por (1)), T_q é o intervalo de quadro e P_{pct} é a probabilidade de erro de pacote em um enlace transmissor-receptor.

Para a análise do atraso, consideraremos que cada estação tenha apenas uma fila para armazenar todos os pacotes que serão transmitidos em qualquer um dos seis enlaces de saída daquela estação. Por outro lado, os pacotes que chegam ao receptor são aqueles gerados localmente, adicionados àqueles provenientes de estações vizinhas, pertencentes à enlaces fonte-destino. Usando o *Princípio da Independência* [6], podemos assumir que o processo de chegada dos pacotes de uma dada estação seja poissoniano, de média λ_{est} pacotes/segundos (de acordo com (1)). Portanto, as estações podem ser modeladas como um sistema de filas do tipo M/D/1, como em [5]. Assim, o atraso médio em um enlace transmissor-receptor é a soma de três componentes [10]: (i) o *tempo médio de espera na fila* W_q , que é igual ao atraso na fila em um sistema M/D/1 com taxa de chegada λ_{est} e tempo médio de serviço $1/\mu = T_q$; (ii) o *tempo de transmissão de um pacote* T_{tx} , que é o tempo necessário para transmitir um pacote de L_m bits à taxa R_b ; (iii) e o *tempo de médio de espera para iniciar a transmissão* $T_e = T_q/2$. Portanto, após algumas manipulações, obtém-se

$$\begin{aligned} \bar{\tau}_{tr} &= W_q + T_{tx} + T_e \\ &= \frac{L_m}{R_b} \left\{ \frac{N}{N_{at}} \left[\frac{1}{2(1-\rho)} \right] + 1 \right\}, \end{aligned} \quad (5)$$

em que, $\rho = \lambda_{est} T_q$ é o fator de utilização da fila. Note-se que ρ é também a probabilidade de uma estação transmissora estar ativa p_{at} , usada no cálculo de \overline{SIR} . Portanto, um aumento em λ_{est} (devido a um aumento de λ_m), provoca um aumento no nível de interferência na rede. O modelo do atraso de pacotes em (5) foi validado por meio de simulação, mas os resultados desta validação não serão apresentados aqui por limitação de espaço (ver [9] para detalhes).

IV. ANÁLISE DE DESEMPENHO

Na análise de desempenho de uma rede ad hoc apresentada aqui será dada atenção particular à influência na *vazão efetiva* η e no *atraso médio* $\bar{\tau}_{tr}$ dos seguintes parâmetros da rede: (i) distância d_r entre as estações transmissoras concomitantes, (ii) expoente de perda de percurso α , (iii) ordem da modulação M e (iv) taxa de geração de pacotes por estação λ_m . Os demais parâmetros serão mantidos fixos, com valores mostrados na Tabela I. O valor $N = 11025$ estações para o tamanho da rede foi escolhido, pois pode ser fatorado em $11025 = 3^2 \times 5^2 \times 7^2$, permitindo, portanto, que a distância entre transmissores concomitantes d_r assumam os valores 3, 5 e 7. O número de estações ativas concomitantemente N_{at} é (usando $N_{at} = N/d_r^2$), respectivamente, 1225, 441 e 225. Além disso, de acordo como (2), para uma rede com $N = 11025$, o número médio de enlaces fonte-destino passando uma estação é $\bar{n}_r = 534035$.

TABELA I

VALORES DOS PARÂMETROS DA REDE AD HOC USADA NA ANÁLISE.

Parâmetro	Valor
Número de estações N	11025
Prob. erro pacote máx ($P_{pct,max}$)	1%
Tamanho do pacote (L_m)	1000 bits
Banda de transmissão (B)	1 MHz

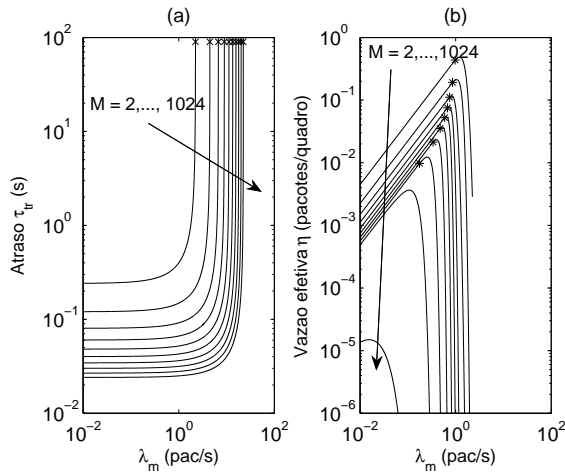


Fig. 2. Atraso médio $\bar{\tau}_{tr}$ e vazão efetiva η em função de λ_m , para distância $d_r = 3$, expoente $\alpha = 3$ e diferentes modulação: (a) atraso médio: cruces (\times) indicam os valores de λ_m (denotado por λ_m^{at}) que provocam atraso infinito; (b) vazão efetiva: asteriscos (*) indicam os valores de λ_m (denotado por λ_m^{int}) que provocam $P_{pct} = 1\%$.

A Figura 2(a) mostra o atraso médio $\bar{\tau}_{tr}$ em função da taxa de geração de pacotes λ_m , para expoente $\alpha = 3$, distância entre transmissores $d_r = 3$ e diversos valores de ordens de modulação M . Para valores pequenos de taxa de geração λ_m , o atraso médio é dominado pelo atraso de transmissão T_{tx} e pelo atraso de espera no quadro T_e , resultando em um valor baixo de atraso. Portanto, o atraso para λ_m pequeno dependerá apenas do nível da modulação. Com o aumento da taxa de geração de pacotes, o tempo de espera na fila W_q tende a dominar o atraso médio total, que será tanto maior quanto maior for a taxa de geração de pacotes. Quando o fator de utilização ρ se aproxima da unidade com o aumento de λ_m , o tempo de espera na fila W_q e, conseqüentemente, $\bar{\tau}_{tr}$ crescem rapidamente, fazendo $\bar{\tau}_{tr} \rightarrow \infty$. Nota-se que há um valor limite de λ_m , denotado aqui por λ_m^{at} , que leva o atraso médio para infinito. Este valor máximo da taxa de geração de pacotes por estação indica uma limitação ao desempenho da rede ad hoc devido ao atraso.

A Figura 2(b) mostra a vazão efetiva média η em função de λ_m , para $d_r = 3$, $\alpha = 3$ e para diferentes ordens de modulação. Para valores pequenos de λ_m , a vazão efetiva cresce linearmente com λ_m , indicando que todos os pacotes que entram na rede saem corretamente. No entanto, a partir de um certo valor de λ_m , a vazão efetiva cai rapidamente. Esta queda na vazão ocorre devido ao aumento na probabilidade de erro de pacotes P_{pct} , que depende, dentre outros fatores, da probabilidade de ativação das estações ρ . Esta probabilidade ρ , por sua vez, depende da taxa de geração de pacote λ_m .

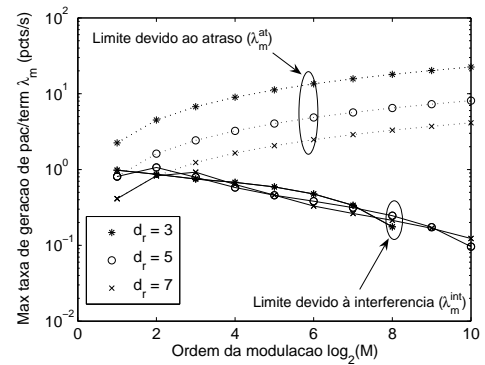


Fig. 3. Máx. taxas de geração de pacotes por estação limitadas pela interferência (λ_m^{int}) e limitadas pelo atraso (λ_m^{at}), em função da modulação, para expoente de perda de percurso $\alpha = 3$ e diferentes valores de d_r .

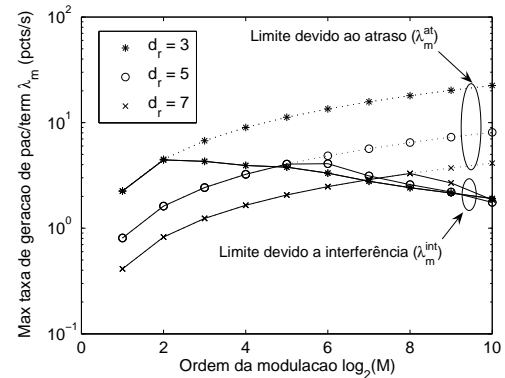


Fig. 4. Máx. taxas de geração de pacotes por estação limitadas pela interferência (λ_m^{int}) e limitadas pelo atraso (λ_m^{at}), em função da modulação, para expoente de perda de percurso $\alpha = 5$ e diferentes valores de d_r .

Portanto, o aumento da taxa λ_m provoca um aumento na probabilidade de uma estação estar ativa e, conseqüentemente, no nível de interferência na rede e na probabilidade P_{pct} . Assim, a injeção de mais pacotes na rede faz o nível de interferência na rede aumentar, o que provoca uma maior perda de pacotes. Denota-se por λ_m^{int} o valor máximo de λ_m que resulta na probabilidade de erro de pacote máxima aceitável de 1%. Portanto, dizemos que λ_m^{int} é um outro limite da taxa de geração de pacotes, agora devido à interferência.

Assim, duas formas de limitações de desempenho da rede são identificadas: devido ao atraso, expressa por λ_m^{at} , e devido à interferência, expressa por λ_m^{int} . Dependendo dos parâmetros e do cenário da rede, o desempenho da rede pode ser limitado pela interferência ($\lambda_m^{at} > \lambda_m^{int}$), ou pelo atraso ($\lambda_m^{at} < \lambda_m^{int}$).

As Figuras 3 e 4 mostram os valores de λ_m^{at} e λ_m^{int} em função da ordem M da modulação para diferentes distâncias d_r , e para $\alpha = 3$ e 5, respectivamente. Expoente $\alpha = 3$ modela um ambiente de propagação de baixa perda de percurso e, portanto, níveis elevados de interferência. Os resultados para $\alpha = 3$ mostram que, para $d_r = 3$, a rede será limitada por interferência, mesmo para modulações robustas (por exemplo, $M = 2$), uma vez que os transmissores concomitantes estão muito próximos entre si e, portanto, o nível de interferência é

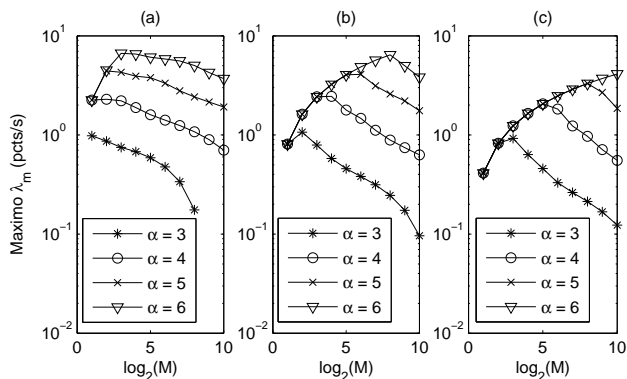


Fig. 5. Máximas taxas λ_m em função da modulação, para diferentes expoentes α : (a) $d_r = 3$, (b) $d_r = 5$ e (c) $d_r = 7$.

elevado. À medida que a distância d_r aumenta, o desempenho da rede com modulações de ordens menores (mais robustas) passa ser limitado pelo atraso. É o que ocorre para $d_r = 5$, com $M = 2$, e para $d_r = 7$, com $M = 2$ e 4. Nestes casos, a distância entre interferentes é tal que resulta em um nível de interferência suficientemente baixo para ser tratado pelas modulações de ordem baixa.

Observamos também pela Figura 3 que, fixados d_r e α , o valor de λ_m^{at} é sempre superior ou igual ao valor λ_m^{int} .

Quando o expoente de perda de percurso aumenta, o nível de interferência nos receptores é reduzido, fazendo com que modulações menos robustas (M maiores) também consigam tratar a interferência e manter a probabilidade de erro de pacote abaixo de 1%. Este comportamento pode ser observado na Figura 4, que mostra os resultados para $\alpha = 5$.

Os resultados das Figuras 3 e 4 também mostram que, para os casos em que a rede é limitada pela interferência e fixados o valores do expoente α e da ordem M , o valor de λ_m^{int} aproximadamente independe da distância d_r .

A Figura 5 mostra os mesmos resultados de λ_m^{at} e λ_m^{int} apresentados nas duas figuras anteriores, mas agora agrupados por valor de distância d_r . Cada gráfico mostra as curvas de máxima taxa de geração λ_m (limitados por atraso ou interferência) em função da ordem da modulação, para um dado valor de d_r . Observa-se que, quando a limitação da taxa de geração é devido ao atraso, o valor de λ_m máximo independe do expoente de perda de percurso, e cresce com o aumento da ordem da modulação. Nesta situação, todas as curvas se coincidem. Quando o desempenho da rede passa a ser limitado pela interferência, o valor máximo de λ_m diminui com o aumento da ordem M , e as curvas para diferentes valores de α desviam-se daquela curva única. Quanto maior for α (ou seja, menor interferência), maiores serão os valores de M que tornam o desempenho limitado pela interferência. Note-se, mais uma vez, que o desempenho de uma rede operando com $d_r = 3$ e $\alpha = 3$ será sempre limitado pela interferência, enquanto que o desempenho de uma rede operando com $d_r = 7$ e $\alpha = 6$ será sempre limitado pelo atraso (para $M \leq 1024$).

Uma análise mais efetiva sobre o comportamento da rede toda pode ser feita através da *máxima taxa agregada de*

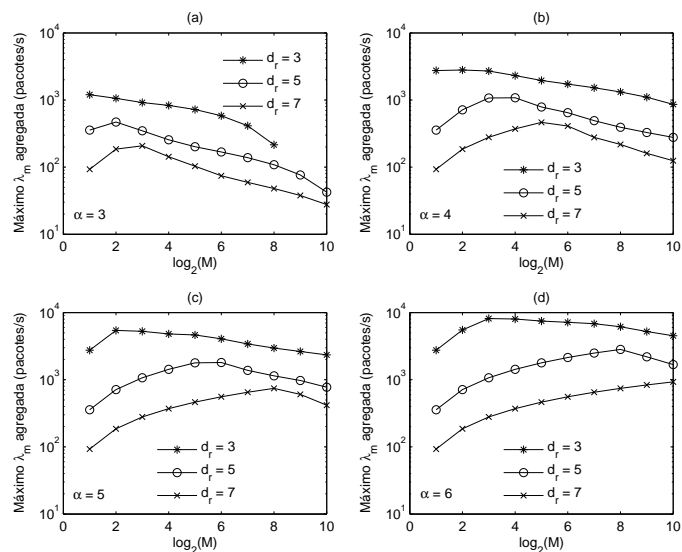


Fig. 6. Máxima taxa agregada de chegada de pacotes $\lambda_{m,A}$ em função da ordem da modulação, para diferentes distâncias d_r : (a) $\alpha = 3$, (b) $\alpha = 4$, (c) $\alpha = 5$ e (d) $\alpha = 6$.

geração de pacote $\lambda_{m,A}$, definida como número máximo de pacotes que podem ser injetados na rede por unidade de tempo, garantidos $P_{pct} \leq 1\%$ e atraso finito. A máxima taxa agregada de geração de pacote pode ser calculada como $\lambda_{m,A} = \lambda_m \times N_{at}$. Os valores de $\lambda_{m,A}$ em função da ordem da modulação, para diferentes expoentes α e distâncias d_r são mostrados na Figura 6. Como esperado, $\lambda_{m,A}$ cresce com a diminuição de d_r , pois mais estações transmissoras são acomodadas. Porém, observa-se que, para um valor fixo de d_r , existe uma ordem de modulação que maximiza $\lambda_{m,A}$, que corresponde à maior ordem de modulação na qual a limitação do desempenho é devido ao atraso.

A seguir apresentamos gráficos na forma vazão vs. atraso, com o objetivo de estudar os compromissos envolvendo estas duas medidas. Relembrando, a vazão efetiva η mede o número de pacotes que trafegam em *um enlace por quadro*. No entanto, sob o ponto de vista do usuário, seria mais útil a informação sobre a vazão de *pacotes próprios por estação*, e expressa em pacotes/s, denotada aqui por η_{est} . Para obtermos η_{est} a partir de η devemos primeiramente dividir esta última pela duração do quadro T_q . Além disso, relembremos que em um enlace há pacotes que estão sendo encaminhados por aquela estação (que corresponde a $p_{fd} \bar{n}_r / (N - 1)$ dos pacotes) e pacotes gerados pela própria estação. Portanto, a vazão de pacotes próprios por estação η_{est} , em pacotes/s, é calculada como:

$$\eta_{est} = \eta \times \frac{1}{\frac{N}{N_{at}} \frac{L_m}{B \log_2 M}} \times \frac{1}{\frac{p_{fd} \bar{n}_r}{N-1} + 1} \quad (6)$$

$$= \lambda_m (1 - P_{pct}). \quad (7)$$

A Figura 7 mostra as curvas $\bar{\tau}_{tr} \times \eta_{est}$ para $d_r = 3$, $\alpha = 3$ e $M = 2, 8$ e 128. Na curva correspondente à $M = 2$ e 8 estão indicados os respectivos valores de λ_m de alguns pontos. Para valores baixos de λ_m , temos $\eta_{est} \approx \lambda_m$, devido à baixa probabilidade de erro de pacote. Aumentar o valor de λ_m corresponde a caminhar pela curva, partindo do

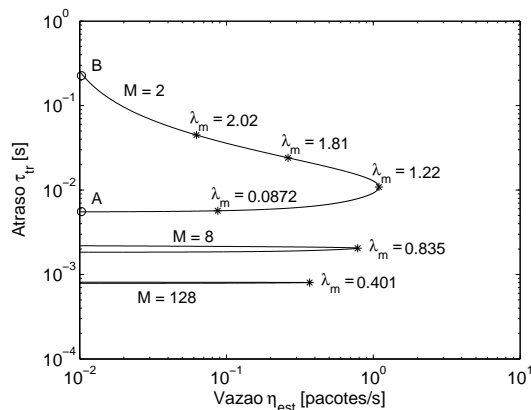


Fig. 7. Atraso $\bar{\tau}_{tr}$ vs. vazão de pacotes próprios η_{est} para $d_r = 3$ e $\alpha = 3$ e diferentes modulações.

ponto A e caminhando em direção ao ponto B, na curva para $M = 2$. Tomando este exemplo de $M = 2$, ao aumentar-se a taxa λ_m (partindo do ponto A), a vazão efetiva e o atraso aumentam inicialmente. Quando a taxa λ_m atinge o valor 1,22 pacotes/s, a vazão de pacotes próprios atinge o seu valor máximo ($\eta_{est} \approx 1,0$ pacote/s), e começa a diminuir (devido ao aumento da probabilidade de erro de pacote), enquanto que o atraso continua a aumentar, agora de forma mais pronunciada.

A Figura 7 mostra ainda que redes empregando modulações de ordens superiores começam a ter a vazão η_{est} degradada para valores de λ_m menores (como mostra as curvas correspondentes a $M = 8$ e 128). Mas, por outro lado, para valores pequenos de λ_m , modulações de ordens superiores levam a valores de atraso menores.

As curvas apresentadas na Figura 7 mostram o compromisso entre vazão e atraso para diferentes modulações, para uma dada rede (d_r e α fixos). Uma forma de operação desejada da rede seria aquela que garantisse a máxima vazão por estação, com atraso reduzido e poucos pacotes perdidos. Esta operação pode ser conseguida através de um esquema de transmissão adaptativo, em que a ordem da modulação M é ajustada com o objetivo de obter a máxima vazão (portanto, ordem M elevada), com baixas perdas de pacotes, às custas de um aumento no atraso. Assim, para valores baixos de taxa de geração de pacotes λ_m , ordens M elevadas são utilizadas. Quando a taxa λ_m aumentar, provocando perdas de pacotes devido o aumento da interferência, os transmissores reduzem a ordem M de suas modulações, tornando-as mais robustas, mas às custas do aumento do atraso. O desempenho de uma rede operando com este esquema adaptativo, para um dado cenário (d_r e α fixos), pode ser representado pelo “envelope” do conjunto de curvas $\bar{\tau}_{tr} \times \eta_{est}$ para diversos valores de M , como exemplifica a Figura 8(a), para $d_r = 3$ e $\alpha = 3$. (Note-se que os valores de λ_m de mudança de ordem de modulação não correspondem à $P_{pct} = 1\%$). A Figura 8(b) traz, em um mesmo gráfico, as curvas envelope $\bar{\tau}_{tr} \times \eta_{est}$ para $\alpha = 3$ e $d_r = 3, 5$ e 7. A figura mostra que, com este esquema, quando maior for a distância de reuso d_r , maior será o valor de taxa de geração λ_m que eventualmente leva a uma limitação da rede pela interferência.

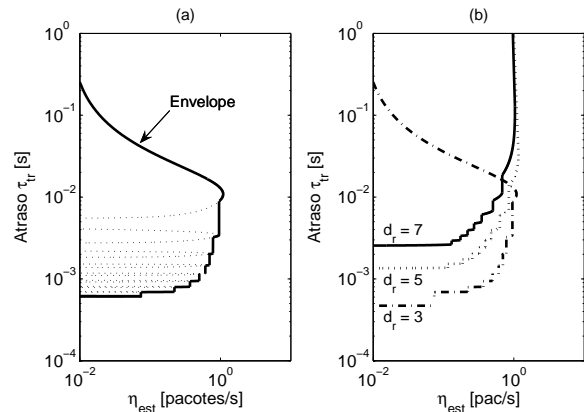


Fig. 8. Envelope das curvas atraso vs. vazão efetiva por estação: (a) construção da curva envelope, para $d_r = 3$ e $\alpha = 3$ (as linhas tracejadas representam as curvas para as diferentes modulações); (b) Envelopes para $\alpha = 3$ e diferentes distâncias d_r .

V. CONCLUSÕES

Neste artigo foi apresentado um modelo analítico para uma rede sem fio ad hoc *multihop* com topologia regular. A análise do desempenho de uma rede ad hoc por meio deste modelo mostrou os efeitos na vazão e no atraso na rede da robustez da modulação, do grau de reuso do canal e do canal de propagação. Os resultados mostraram que, dependendo do controle da interferência e da robustez da modulação, o desempenho da rede pode ser limitado pela interferência ou pelo atraso. Foi também apresentada uma análise conjunta da vazão e atraso na rede, que indicou o desempenho de uma rede operando com esquema adaptativo de modulação. Tal esquema objetiva a maximização da vazão com níveis controlados de perdas de pacotes, mas às custas do atraso.

REFERÊNCIAS

- [1] H. Takagi and L. Kleinrock, “Optimal Transmission Ranges for Randomly Distributed Packet Radio Terminals”, *IEEE Transactions on Communication*, vol.32, pp. 257-264, Março 1984.
- [2] M. Subbarao and B. Hughes, “Optimal Transmission Ranges and Rodes Rates for a Frequency-Hop Packet Radio Networks”, *IEEE Transactions on Communication*, vol 48, pp. 670-678, Abril 2000.
- [3] R. Nelson and L. Kleinrock, “Spatial TDMA: A Collision Free Multihop Channel Access Portocol”, *IEEE Transactions on Communications*, vol COM-33, no. 9, pp. 934-944, Setembro 1985.
- [4] J. Gronkvist, *Assignment Strategies for Spatial Reuse TDMA*, Master’s Thesis, Royal Institute of Technology, Março 2002.
- [5] B. Shrader, M. Sanchez, and T. Giles, “Throughput-Delay Analysis of Conflict-Free Scheduling in Multihop Ad Hoc Networks,” *Swedish Workshop on Wireless Ad Hoc Networks*, Maio 2003.
- [6] L. Kleinrock, *Queueing Systems Volume II: Computer Applications*. Willey-Intersciency, Ed. New York, 1976.
- [7] S. Panichpapiboon, G. Ferrari, N. Wisitpongphan, and O. K. Tonguz, “Pros and Cons of Route Reservation in Static Multi-Hop Networks”, *IEEE International Conference on Communications*, pp. 3000-3004, 2005.
- [8] M. D. Yacoub, *Wireless Tecnology: Portocols, Standards, and Techniques*, CRC Press, 2001.
- [9] R. R. F. Dias, *Avaliação de Desempenho de Redes Ad Hoc Sem Fio*, Tese de Mestrado, FECC - UNICAMP, 2007.
- [10] R. Rom and M. Sidi, *Multiple Access Protocols: Performance and Analysis*, Springer-Verlag, New York, 1990.