

Transmissão Adaptativa em Redes Ad Hoc CDMA

M. Geandre Rêgo, R. P. Ramos, Tarciana Lopes, R. Baldini Filho e Celso de Almeida

Resumo—Este artigo analisa a utilização de transmissão adaptativa em redes ad hoc CDMA em um canal AWGN. A taxa de dados é modificada adaptativamente de acordo com o nível de interferência total, tal que a relação sinal-interferência desejada possa ser mantida constante. O desempenho é avaliado através da eficiência da informação. Os resultados numéricos mostram que a taxa adaptativa otimizada aumenta significativamente o desempenho de redes ad hoc CDMA.

Palavras-Chave—redes ad hoc, CDMA, transmissão adaptativa.

Abstract—This work investigates the benefit of adaptive transmission in CDMA ad hoc networks on AWGN channel. The data rate gain is adaptively changed according to the total interference level for a required signal-to-interference ratio (SIR). Performance is evaluated in terms of the information efficiency. The numerical results shows that the optimised adaptive rate significantly increases the CDMA ad hoc network performance.

Keywords—ad hoc networks, CDMA, adaptive transmission.

I. INTRODUÇÃO

Recentemente, um intenso esforço de pesquisa tem sido empregado para melhorar o desempenho de redes ad hoc. Um dos principais desafios presentes em redes ad hoc é conseguir aumentar sua vazão total de dados. A vazão de dados baixa é atribuída às características hostis do canal de rádio móvel e à natureza dos protocolos de Controle de Acesso ao Meio (MAC - Medium Access Control), geralmente baseados em regras de contenção [1] [2].

Redes ad hoc que utilizam a técnica de múltiplo acesso CDMA (Code Division Multiple Access), diferentemente dos modelos tradicionalmente encontrados na literatura [3]–[5], permitem múltiplas transmissões simultâneas com sucesso. Nos sistemas ad hoc CDMA, múltiplos pacotes com diferentes códigos de espalhamento podem ser recebidos corretamente ao mesmo tempo por diferentes receptores. As principais características dos sistemas CDMA são: resistência aos efeitos causados pelos multipercursos, capacidade *anti-jamming*, diversidade inerente de multipercurso no tempo e rejeição a interferências. Portanto, a técnica CDMA apresenta-se como uma tecnologia adequada para ser utilizada em redes ad hoc.

Alguns modelos de redes ad hoc CDMA podem ser encontrados na literatura [4]–[8]. Em [4], a distribuição da potência interferente e o alcance de transmissão ótimo foram obtidos para redes ad hoc CDMA em um canal AWGN (Additive White Gaussian Noise). O modelo proposto em [5]

considera sombreamento e desvanecimento no modelo de [4]. Um esquema de controle de potência foi proposto por [6]. Em [7] propõe-se um esquema de diversidade de rota para redes ad hoc CDMA em um canal com desvanecimento Rayleigh. E mais recentemente, [8] investigou o efeito da diversidade multipercurso em redes ad hoc CDMA.

No entanto, um problema fundamental em redes CDMA é manter o desempenho em níveis satisfatórios diante da limitação imposta pela interferência de múltiplo acesso (MAI - Multiple Access Interference). Em sistemas com controle de potência e taxa de dados fixa, existe uma limitação prática com relação ao número de usuários de modo a garantir comunicação segura. Outro problema relacionado a sistemas que utilizam taxa de dados fixa ocorre quando o nível de tráfego é muito menor que o número prático de usuários na rede, assim existe uma margem redundante na capacidade do sistema [10].

Estudos em transmissão adaptativa para minimizar os problemas citados acima e utilizar os recursos do sistema mais eficientemente são encontrados em [10]–[14]. Em [15] investigou-se os efeitos da modulação adaptativa no contexto de redes ad hoc CDMA. Entretanto, nenhuma análise foi feita em redes utilizando transmissão de dados adaptativa. O objetivo deste artigo é analisar o ganho de desempenho que a transmissão de pacotes adaptativa pode oferecer em redes ad hoc CDMA, através da variação do ganho de processamento. A estratégia consiste na mudança do ganho de processamento para os nós com taxa de dados variável de modo a garantir uma energia por bit que satisfaça a relação sinal-interferência desejada. Como o ganho de processamento é o número de chips por bit, o ganho de processamento adaptativo com taxa de chips fixa resulta na transmissão adaptativa com taxa de dados variável.

Este trabalho utiliza uma medida de desempenho que incorpora o fator eficiência espectral e o progresso esperado por salto, este último com particular relevância na análise de redes multi-saltos.

O restante deste artigo é organizado como segue: a seção II descreve o modelo de sistema. Expressões para a medida de desempenho considerando os esquemas não-adaptativo e adaptativo são descritos na seção III. A seção IV discute o impacto do esquema proposto sobre o desempenho do modelo assumido através de resultados numéricos. Por fim, a seção V sintetiza as contribuições deste trabalho.

II. MODELO DO SISTEMA

O modelo de rede adotado é uma rede ad hoc DS (Direct Sequence)-CDMA com modulação BPSK (Binary Phase Shift Keying) e formato de pulso de chip retangular. O sistema é *slotted* e a duração de cada *slot* é igual ao tempo de transmissão de um pacote. Os nós são aleatoriamente distribuídos

M. Geandre Rêgo, Tarciana Lopes, R. Baldini Filho e Celso de Almeida, DCLab, Departamento de Comunicações, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brasil, Emails: [geandre,tarciana,baldini,celso]@decom.fee.unicamp.br. Este trabalho foi parcialmente financiado pela CAPES.

R. P. Ramos, Centro de Engenharia, Modelagem e Ciências Sociais Aplicadas, Universidade Federal do ABC, Santo André, Brasil, Email: rodrigo.ramos@ufabc.edu.br.

em um plano e seguem um processo Poisson bi-dimensional com número médio de terminais por unidade de área igual a λ :

$$P[n \text{ nós em } S] = \frac{e^{-\lambda A_S} (\lambda A_S)^k}{k!}, \quad (1)$$

onde A_S é a área de uma dada região S no plano.

Todos os terminais têm supostamente pacotes pra transmitir em qualquer tempo, o que corresponde a suposição de tráfego intenso. Um nó só pode transmitir um pacote se ele estiver em modo de transmissão. Cada nó transmite no mesmo nível de potência fixado com probabilidade p e independentemente dos outros. Durante um *slot*, uma captura instantânea dos nós é tirada, ou seja, a topologia de rede é constante sobre o tempo de transmissão de um pacote, o que é equivalente a ter um nível de interferência constante durante este intervalo de tempo [4].

No modelo adotado, existem ao todo $K + 1$ pares transmissor-receptor (enlaces ativos) na rede. É considerado um enlace de distância R entre o par transmissor-receptor de interesse. Considere que os $K + 1$ nós transmissores interferentes estão simultaneamente transmitindo com mesma potência P_t e que $1/r^\beta$ é a perda de propagação. A energia de bit é dada por $E_b = P_r T_b$, onde $P_r = P_t/r^\beta$ é a potência recebida e T_b é a duração de um bit.

Este trabalho considera um rede finita, na qual a região de interesse está dentro de um círculo de raio A . O receptor de interesse está centrado na origem do círculo de raio A . Além disso, a potência transmitida é assumida constante sobre um círculo de raio suficientemente pequeno r_0 .

Para sistemas CDMA usando detecção convencional em um ambiente assíncrono, a relação Sinal-Interferência+Ruído por bit (γ_b) em um canal AWGN é dada por:

$$\gamma_b = \frac{P_t R^{-\beta} T_b}{N_0 + \frac{2}{3} \frac{I}{R_c}} \quad (2)$$

onde N_0 é a densidade espectral de potência do ruído, R_c é a taxa de chips que é igual a largura de banda disponível e I é uma variável aleatória que representa a potência interferente:

$$I = \sum_{k \text{ em } D_A} P_t r_k^{-\beta} \quad (3)$$

onde r_k é a distância entre o k -ésimo nó transmitindo e o receptor desejado, $D_A = \pi A^2$ é a área do círculo de raio A e β é o expoente perda de percurso, o qual se assume igual a 4.

A expressão de γ_b está diretamente relacionada ao número de terminais transmitindo. Dessa forma, pode-se aproximar (2) por:

$$\gamma_b \simeq \frac{P_t R^{-4} T_b}{N_0 + \frac{2}{3} \frac{P_t \bar{I}}{R_c}} \quad (4)$$

onde \bar{I} é a interferência média normalizada pela potência de transmissão, dada por:

$$\bar{I} = \sum_{k \text{ em } D_A} E\{r_k^{-4}\} \quad (5)$$

Como as posições dos nós estão uniformemente distribuídas na região circular de raio A , a função densidade de probabilidade de r_k é dada por:

$$p_{r_k}(r_k) = \begin{cases} \frac{2r_k}{A^2}, & r_k \leq A \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

Então, obtém-se o valor médio:

$$\begin{aligned} E\{r_k^{-4}\} &= \int_{-\infty}^{\infty} r_k^{-4} p_{r_k}(r_k) dr_k \\ &= \frac{1}{A^2} \left(\frac{2}{r_0^2} - \frac{1}{A^2} \right) \end{aligned} \quad (7)$$

Portanto, substituindo (7) em (5), tem-se que o valor médio da interferência normalizada pela potência transmitida é:

$$\bar{I} = (K) r_{eq}^{-4} \quad (8)$$

onde

$$r_{eq}^{-4} = \frac{1}{A^2} \left(\frac{2}{r_0^2} - \frac{1}{A^2} \right) \quad (9)$$

A eq. (8) é uma boa aproximação para avaliar o desempenho de uma rede ad hoc CDMA em um canal gaussiano [16].

III. MEDIDA DE DESEMPENHO

Em [4]–[7], o progresso esperado por salto foi a medida de desempenho utilizada para avaliar o comportamento de redes multi-saltos. Esta medida é uma função da vazão local de um salto e o progresso feito por um salto em direção ao destino final, onde ambos tem influência na vazão de dados fim-a-fim. Recentemente, um fator de eficiência espectral foi incorporado ao progresso esperado por salto, assim uma nova medida, eficiência de informação, foi utilizada para avaliar o desempenho de sistemas com diferentes taxas de código [15]:

$$\eta_I = \frac{\tau(p) P_s \sqrt{N/\lambda\pi} R_b}{B} \quad (10)$$

onde P_s é a probabilidade de receber corretamente um pacote, dada por:

$$\begin{aligned} P_s &= (1 - P_b)^{N_p} \\ &= \left(1 - Q\left(\sqrt{2\gamma_b}\right) \right)^{N_p} \end{aligned} \quad (11)$$

onde N_p é o número de bits de dados em um pacote.

A variável $R_b = 1/T_b$ denota a taxa de bits e B a largura de banda disponível do sistema, igual a R_c . O fator $N = \lambda\pi R^2$ é o número médio de nós que estão mais próximos do transmissor que do receptor. Ele pode ser também interpretado como uma medida do número médio de nós que estão sendo “saltados”.

A tendência de um dado transmissor estabelecer um enlace com o receptor desejado é chamada de tendência de formação de pares e é definida como [4]:

$$\tau(p) = (1 - p)(1 - e^{-p}) \quad (12)$$

A. Esquema Não-Adaptativo

A rede ad hoc DS-CDMA considera a coexistência de taxa de dados fixa e variável. Os nós da rede podem ser fonte tanto de tráfego com taxa de dados fixa (K_f) como tráfego com taxa de dados variável (K_v). Assim, a relação Sinal-Interferência Total para o canal gaussiano é dada por:

$$\gamma_b \simeq \frac{P_t R^{-4} T_b}{N_0 + \frac{2}{3} \frac{(K_f + K_v) P_t r_{eq}^{-4}}{R_c}}, \quad (13)$$

Fazendo uma variável definida como o número equivalente de nós com taxa de dados fixa incluindo o ruído, temos:

$$K'_f = K_f + \frac{N_0}{2P_t r_{eq}^{-4} / 3R_c} = K_f + \left(\frac{2E_c r_{eq}^{-4}}{3N_0} \right)^{-1} \quad (14)$$

onde $E_c = P_t R_c$ é a energia de chip.

Substituindo (14) em (13), chega-se ao resultado:

$$\gamma_b \simeq \frac{G_p}{\frac{2}{3} (K_v + K'_f) \left(\frac{r_{eq}}{R} \right)^{-4}} \quad (15)$$

onde G_p é o ganho de processamento igual a $T_b R_c$.

Assim, a expressão para eficiência de informação resulta em:

$$\eta_I = \frac{\tau(p) P_s \sqrt{N/\lambda\pi}}{G_p} \quad (16)$$

B. Esquema Adaptativo

No esquema de transmissão adaptativa, o ganho de processamento, ou seja, a duração de bit, muda de acordo com o tráfego do canal. Ao mudar a duração de bit, a energia E_b é controlada para compensar a variação da interferência total, de modo a manter γ_b constante em um valor desejado, γ_0 :

$$\gamma_b \simeq \frac{T_b R_c}{\frac{2}{3} (K_v + K'_f) \left(\frac{r_{eq}}{R} \right)^{-4}} = \gamma_0 \quad (17)$$

Dessa forma, pode-se definir a taxa adaptativa R_a como sendo:

$$R_a = \frac{1}{T_b} = \frac{3R_c}{2(K_v + K'_f) \left(\frac{r_{eq}}{R} \right)^{-4} \gamma_0} \quad (18)$$

Assim, a probabilidade de sucesso de pacote é também mantida constante:

$$P_{sa} = \left(1 - Q\sqrt{2\gamma_0} \right)^{N_p} \quad (19)$$

Portanto, a expressão para eficiência de informação para um esquema com taxa de transmissão adaptativa é dada por:

$$\eta_I = \frac{\tau(p) P_{sa} \sqrt{N/\lambda\pi} R_a}{R_c} \quad (20)$$

O valor de γ_0 ótimo (γ_{0p}) que maximiza a eficiência de informação, é obtido através da resolução da equação: $d\eta_I/d\gamma_0 = 0$. Para facilitar o cálculo do γ_{0p} utilizou-se a seguinte aproximação para a função Q :

$$Q(\sqrt{2\gamma_0}) \approx \frac{1}{2} e^{-2\gamma_0} \quad (21)$$

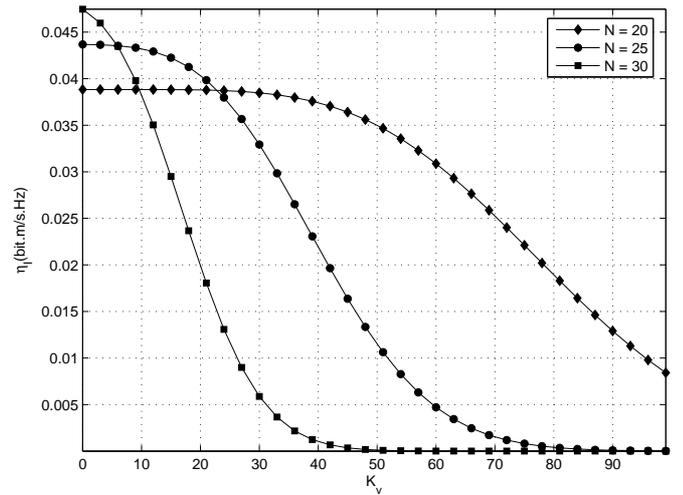


Fig. 1. Eficiência de informação versus número de interferentes parametrizada por N .

IV. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A avaliação da eficiência de informação para um sistema com taxa de dados adaptativa é realizada através de resultados numéricos. Nos resultados apresentados, fixou-se os seguintes parâmetros: $p = 0.4$, $\lambda = 0.1$, $K'_f = 25$, $B = 20\text{MHz}$, $N_p = 512$, $r_0 = 1\text{m}$ e $A = 100\text{m}$.

A Figura 1 apresenta a eficiência da informação versus número de interferentes com taxa de dados variável. O ganho de processamento foi fixado em 128. Pode-se notar do gráfico o efeito da variação de N na eficiência da informação. O valor de N pode ser interpretado como o número médio de nós que estão dentro do alcance escolhido (R). Da Figura, pode ser visto que um valor de N maior não necessariamente significa melhor desempenho (número de saltos menor até o destino), pois a MAI também torna-se maior. Por outro lado, um N menor, mesmo significando probabilidade maior de receber corretamente um pacote, impõe um número de saltos maior até o destino, aumentando assim artificialmente o tráfego da rede.

A eficiência da informação para o esquema adaptativo em função do número de interferentes é mostrada na Figura 2. O alcance de transmissão é fixado em 10m e o ganho de processamento em 128 para o esquema não adaptativo. As curvas são parametrizadas pelo valor da relação sinal-interferência desejada. Pode ser visto nas curvas que a escolha do valor de γ_0 é crucial para o desempenho do sistema adaptativo. Um γ_0 maior não essencialmente produz melhor desempenho no que diz respeito à eficiência da informação, já que existe uma penalidade na taxa de bits para manter a relação sinal-interferência desejada. A Figura 3 ilustra o comportamento da eficiência de informação em relação a γ_0 para 10, 50 e 100 interferentes. Pode ser visto na Figura que existe um valor γ_0 que maximiza o valor da eficiência da informação independente do número de interferentes.

Na Figura 4 pode-se avaliar o comportamento da eficiência da informação para o caso adaptativo ótimo. As curvas são

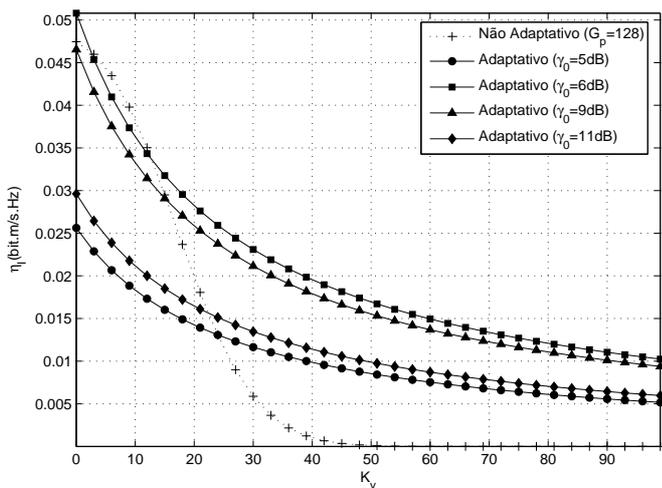


Fig. 2. Eficiência de informação versus número de interferentes para vários valores de γ_0 .

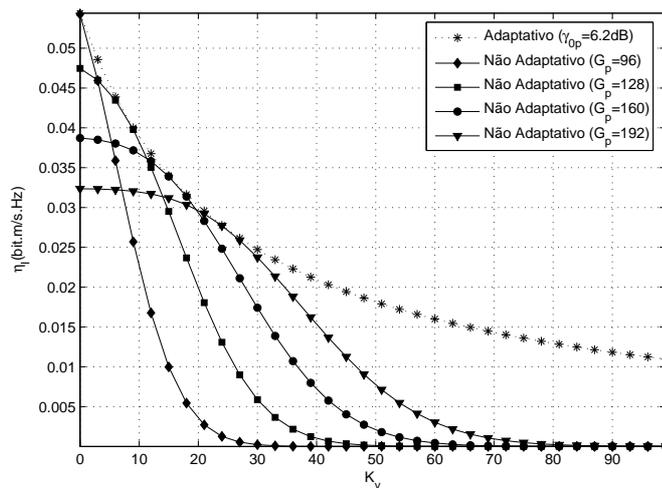


Fig. 4. Eficiência de informação versus número de interferentes variando G_p .

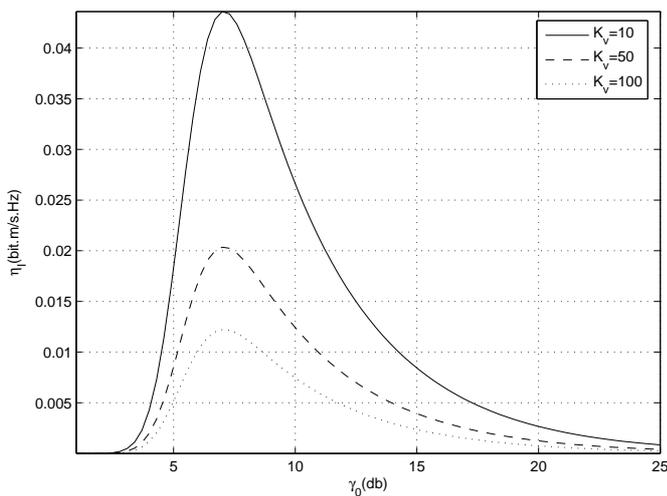


Fig. 3. Eficiência de informação em função de γ_0 para diferentes valores interferentes.

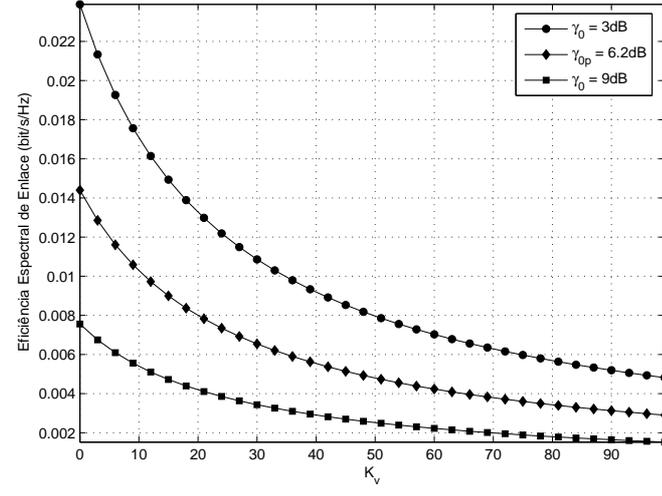


Fig. 5. Taxa de bits versus número de interferentes para diferentes valores de γ_0 .

traçadas em função do número de interferentes. O γ_0 ótimo encontrado foi $\gamma_{0p} = 6.2dB$. As curvas para o caso não adaptativo apresentam diferentes valores de ganho de processamento. Note que o esquema proposto com taxa de dados adaptativa com $\gamma_0 = \gamma_{0p}$ tem melhor eficiência da informação que os esquemas não adaptativos para qualquer ganho de processamento. Para os sistemas com taxas não adaptativas há um compromisso entre o número de usuários e a probabilidade de sucesso de pacote. No modelo adaptativo proposto, a relação sinal-interferência desejada é mantida constante apesar do aumento no número de interferentes.

No entanto, manter a relação sinal-interferência dentro de um nível desejado tem um custo. Para o esquema proposto, isto implica na diminuição da taxa de dados. A Figura 5 mostra a eficiência espectral de enlace versus número de interferentes para alguns valores de γ_0 . A eficiência espectral de enlace

pode ser definida como a capacidade de canal de um enlace ponto-a-ponto para um dada modulação (bit/s/Hz). Entretanto, a eficiência espectral de enlace baixa não necessariamente significa que o esquema é ineficiente do ponto de vista do sistema. Como a técnica de múltiplo acesso utilizada é o CDMA, e o fator de reuso é igual a 1, o aumento do número de nós na rede faz com que haja uma utilização melhor do espectro.

V. CONCLUSÕES

Este artigo mostra que um sistema com taxa de dados adaptativa, com relação sinal-interferência ótima, tem desempenho significativamente melhor quando comparado aos sistemas com taxa de bit fixa. Enquanto no sistema não adaptativo, o aumento do número de nós interferentes diminui o valor da eficiência de informação, no sistema adaptativo

com relação sinal-interferência ótima, o valor da eficiência da informação apresenta maiores valores para o mesmo número de interferentes. Como consequência de se manter a relação sinal-interferência em um nível desejado no sistema adaptativo, há uma redução de eficiência espectral de enlace. No entanto, essa redução acompanhada do significativo aumento na probabilidade de sucesso de pacote e do fator de reuso 1, característico de sistemas CDMA, torna o esquema com taxa de dados adaptativa uma escolha atrativa para uma rede com um grande número de nós, além de notavelmente aumentar a capacidade da rede.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer à CAPES pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS

- [1] R. Ramanathan and J. Redi, "A Brief Overview of Ad Hoc Networks: Challenges and Directions". *IEEE Communications Magazine*, v. 40, p. 20-22, 2002.
- [2] A. Muqattash and M. Krunz, "CDMA-Based MAC Protocol for Wireless Ad Hoc Networks". *International Symposium on Mobile Ad Hoc Network and Computing (MOBIHOC'03)*, p. 153-154, Junho 2003.
- [3] R. Jurdak, C. Lopes and P. Baldi, "A Survey, Classification and Comparative Analysis of Medium Access Control Protocols for Ad Hoc networks". *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, v. 6, n. 1, 2004.
- [4] E. S. Sousa and J. A. Silvester, "Optimum Transmission Ranges in a Direct-Sequence Spread-Spectrum Multihop Packet Radio Network". *IEEE Journal on Sel. Areas in Communications*, v. 8, n. 5, p. 762-771, Junho 1990.
- [5] M. Zorzi and S. Pupolin, "Optimum Transmission Ranges on Multihop Packet Radio Networks in the Presence of Fading". *IEEE Transactions on Communications*, v. 43, n. 7, p. 2201-2205, Julho 1995.
- [6] Y. Sanada and M. Nakagawa, "Power Control Techniques in a Multihop CDMA Packet Radio Network". *IEICE Transactions on Communications*, v. E79-B, n. 7, p. 1287-1294, Setembro 1996.
- [7] M. Souryal, B. Vojcic and R. Pickholtz, "Ad Hoc, Multihop CDMA Networks with Route Diversity in a Rayleigh Fading Channel". *Proceedings IEEE MILCOM*, v. 8, n. 5, p. 1003-1007, 2001.
- [8] M. Geandre Rego, R. P. Ramos, R. Baldini Filho and C. de Almeida, "CDMA Ad Hoc Networks in Multipath Fading Channels". *Annals of IEEE Ninth International Symposium on Spread Spectrum Techniques and Applications (ISSSTA 2006)*, Manaus, 2006.
- [9] J. G. Proakis, *Digital Communications*. McGraw-Hill, Quarta edição, 2001.
- [10] K. Choi, Y. Chae and J. Park, "Throughput-delay Performance of interference Level-Adaptive Transmission in Voice/Data Integrated CDMA Network with Variable Spreading Gain". *IEE Proceedings*, v. 151, n. 3, p. 217-220, June 2004.
- [11] O. Sallent and R. Agustí, "Adaptive Schemes for Packet Data in a DS-CDMA Environment". *Proceedings IEEE 47th Vehicular Technology Conference (VTC'97)*, v. 2, p. 1019-1023.
- [12] J. M. Jacobsmeyer, "Congestion Relief on Power-Controlled CDMA Networks". *IEEE J. Sel. Areas Communications*, p. 1758-1761, 1996.
- [13] B. Hashem and E. Sousa, "Performance Evaluation of DS/CDMA Systems Employing Adaptive Transmission Rate Under Imperfect Power Control". *Proceedings IEEE Int. Symposium on Personal Indoor, and Mobile Radio Communications - PIMRC*, v. 2, p. 932-936, 1998.
- [14] R. Walton and J. Ketchum, "Performance of a Multirate CDMA Packet Data System". *Proc. IEEE Int. Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications - PIMRC*, vol. 2, p. 841-847, 1998.
- [15] M. Souryal, B. Vojcic and R. Pickholtz, "Adaptive Modulation in Ad Hoc DS/CDMA Packet Radio Networks". *IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM'03)*, p. 351-356, Dezembro 2003.
- [16] M. Geandre Rego, R. P. Ramos, R. Baldini Filho and C. de Almeida, "Interference Evaluation in CDMA Ad Hoc Networks". *Proceedings of International Telecommunications Symposium (ITS 2006)*, Fortaleza, 2006.