

CÁLCULO DE THROUGHPUT PARA PROTOCOLOS RLP/TCP EM MODULAÇÃO BPSK

Celso de Almeida, Teógenes B. Nóbrega, Gustavo Fraidenraich e Silvia R. Coelho

DECOM/FEEC/UNICAMP

CP 6101, CEP: 13083-970, Campinas-SP, Brasil
e-mail: (celso,teogenes,gf,silvia)@decom.fee.unicamp.br

RESUMO

Este trabalho apresenta expressões algébricas e o cálculo do *throughput* para protocolos RLP/TCP (*Radio Link Protocol/Transport Control Protocol*) para modulação BPSK, em função da relação sinal-ruído média por bit, em casos de baixa e alta mobilidades. É mostrado que não é conveniente a utilização de entrelaçamento em transmissão de dados por um canal com desvanecimento correlacionado. Um combinador *maximal-ratio* é usado para implementar a utilização de diversidade.

1. INTRODUÇÃO

A demanda pelos serviços de dados, e-mail, navegação, etc. em comunicações móveis tem aumentado rapidamente. O TCP (*Transport Control Protocol*), um dos protocolos padrões da internet, foi projetado para ser utilizado em redes fixas, onde a taxa de erro de bits do meio é muito baixa e o congestionamento é a principal causa de perda de pacotes. No entanto, quando o TCP é utilizado em canais sem fio, os quais são caracterizados por uma alta taxa de erro, seu desempenho é severamente afetado. Geralmente, introduz-se o RLP (*Radio Link Protocol*) na camada de enlace com o objetivo de reduzir essa taxa de erro.

Este trabalho apresenta expressões algébricas e o *throughput* dos protocolos TCP/RLP em função da relação sinal-ruído média por bit ($\bar{\gamma}_b$). $\bar{\gamma}_b$ é o melhor parâmetro para a comparação de vários sistemas, uma vez que seu significado físico é a potência irradiada nos sistemas móveis.

Foi considerado um canal AWGN (*Additive White Gaussian Noise*) com desvanecimento Rayleigh, modulação BPSK, codificação com detecção ideal, alta e baixa mobilidades e diversidade utilizando o combinador *maximal-ratio*. Os resultados das expressões algébricas são comparados com valores obtidos em simulação computacional para verificar a validade das expressões.

O trabalho é dividido nas seções a seguir. Na seção 2 é obtida a expressão da probabilidade de erro de bit para o caso BPSK. Na seção 3 mostra-se a expressão da probabilidade de erro de um bloco de n bits para baixa e alta mo-

bilidades. A seção 4 apresenta as expressões de *throughput* para o RLP e o TCP no caso de nenhuma ou de uma retransmissão. A seção 6 mostra o cálculo de probabilidade de erro de bloco utilizando-se diversidade para os casos de desvanecimento lento e rápido. Finalmente, a seção 7 apresenta as conclusões do trabalho.

2. PROBABILIDADE DE ERRO DE BIT

Um sistema de transmissão BPSK em um canal AWGN apresenta probabilidade de erro de bit dada por [1]:

$$P_b = Q(\sqrt{2\gamma_b}) \quad (1)$$

onde $Q(\cdot)$ é a função complementar de erro gaussiana, e $\gamma_b = \alpha^2 \frac{E_b}{N_0}$ é a relação sinal-ruído, sendo α uma constante que determina a perda do canal.

Em canais com desvanecimento Rayleigh lento e não-seletivo, pode-se mostrar que a função densidade de probabilidade (fdp) da relação sinal-ruído por bit é dada por:

$$p(\gamma_b) = \frac{1}{\bar{\gamma}_b} \exp\left(-\frac{\gamma_b}{\bar{\gamma}_b}\right) \quad (2)$$

onde $\bar{\gamma}_b = \alpha^2 \frac{E_b}{N_0} = 2\sigma^2 \frac{E_b}{N_0}$ é a relação sinal-ruído média e α é o desvanecimento modelado por uma variável aleatória Rayleigh, ou seja:

$$p(\alpha) = \frac{\alpha}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{\alpha^2}{2\sigma^2}\right) \quad (3)$$

A probabilidade de erro média por bit é obtida pelo condicionamento da probabilidade de erro de bit (1) pela fdp da relação sinal-ruído por bit (2) e vale [1]:

$$P_b = \frac{1}{2} \left(1 - \sqrt{\frac{\bar{\gamma}_b}{1 + \bar{\gamma}_b}}\right) \simeq \frac{1}{4\bar{\gamma}_b} \text{ para } \bar{\gamma}_b \gg 1 \quad (4)$$

3. PROBABILIDADE DE ERRO DE BLOCO

Suponha um código de bloco composto por palavras-código de n bits e capacidade de detecção de erros ideal [4]. Assim, a probabilidade de ter-se pelo menos um bit errado no bloco de tamanho n é dada por:

$$P_{bloco} = 1 - (1 - P_b)^n \simeq nP_b \text{ para } P_b \ll 1 \quad (5)$$

Para um usuário com alta mobilidade, o desvanecimento tende a ser decorrelacionado. Neste caso, o conhecimento da amplitude do desvanecimento em um bit não fornece informação sobre a amplitude do desvanecimento do próximo bit. Assim, a probabilidade de erro de bloco é obtida pela substituição de (4) em (5), ou seja:

$$P_{bloco} = 1 - \left[1 - \frac{1}{2} \left(1 - \sqrt{\frac{\bar{\gamma}_b}{1 + \bar{\gamma}_b}} \right) \right]^n \simeq \frac{1}{4\bar{\gamma}_b} \text{ para } \bar{\gamma}_b \gg 1 \quad (6)$$

Por outro lado, o desvanecimento de amostras consecutivas tende a ser muito correlacionado em usuários com baixa mobilidade. Neste caso, pode-se supor que o desvanecimento é constante em todo o bloco. Assim, a probabilidade de erro de bloco média pode ser obtida pela utilização de (1) em (5) e a seguir pelo descondicionamento de (5) pela fdp da relação sinal-ruído por bit (2), ou seja:

$$P_{bloco} = \int_0^\infty \left\{ 1 - \left[1 - Q(\sqrt{2\gamma_b}) \right]^n \right\} \frac{1}{\bar{\gamma}_b} \exp(-\frac{\gamma_b}{\bar{\gamma}_b}) d\gamma_b \quad (7)$$

4. RADIO LINK PROTOCOL - RLP

O protocolo RLP trabalha com pacotes de comprimento muito menor que o do TCP, justamente para diminuir a probabilidade de erro de bloco, e conseqüentemente o número de retransmissões na camada TCP (vide (5)). Com o objetivo de aumentar o *throughput* é importante que o protocolo RLP faça tantas retransmissões quantas forem possíveis para minimizar a probabilidade de erro de bloco, de modo que o TCP não tenha que solicitar retransmissão do seu pacote [3].

Dado que a detecção de erro na camada RLP é considerada ideal, e que um pedido de retransmissão (NAK) do protocolo RLP será solicitado todas as vezes em que houver pelo menos um erro de bit, pode-se escrever seu *throughput* como:

$$\eta_{RLP} = R_b \frac{I_{RLP}}{I_{RLP} + H_{RLP}} (1 - P_{bloco,RLP}) \quad (8)$$

onde R_b é a taxa de bits, I_{RLP} e H_{RLP} representam, respectivamente, o número de bits de informação e de cabeçalho do protocolo RLP, e $P_{bloco,RLP}$ representa a probabilidade de ter havido pelo menos um erro de bit dentro de 1 bloco RLP. Observe que a probabilidade de perda do pacote NAK foi ignorada, pois sem perda de generalidade, o canal de retorno é considerado ideal.

Supondo que um pacote TCP seja composto de M pacotes RLP e supondo que o protocolo RLP faça apenas uma transmissão (nenhuma retransmissão), então o *throughput* do protocolo TCP é dado por:

$$\begin{aligned} \eta_{TCP} &= \eta_{RLP} \frac{I_{TCP}}{I_{TCP} + H_{TCP}} \\ &\times \left[1 - \sum_{j=1}^M \binom{M}{j} P_{bloco,RLP}^j (1 - P_{bloco,RLP})^{M-j} \right] \\ &= \eta_{RLP} \frac{I_{TCP}}{I_{TCP} + H_{TCP}} (1 - P_{bloco,RLP})^M \end{aligned} \quad (9)$$

onde I_{TCP} e H_{TCP} representam, respectivamente, o número de bits de informação e de cabeçalho do protocolo TCP. Além disso, supôs-se que há retransmissão do protocolo TCP toda vez que existir um erro em pelo menos um dos seus M segmentos RLP.

No caso onde o protocolo RLP realiza uma retransmissão, o *throughput* é dado por:

$$\eta_{TCP} = \eta_{RLP} \frac{I_{TCP}}{I_{TCP} + H_{TCP}} (1 - P_{bloco,TCP}) \quad (10)$$

onde $P_{bloco,TCP}$ representa a probabilidade de perda de um pacote TCP, dada por:

$$\begin{aligned} P_{bloco,TCP} &= \sum_{j=1}^M \binom{M}{j} P_{bloco,RLP}^j (1 - P_{bloco,RLP})^{M-j} \\ &\times \sum_{i=1}^j \binom{j}{i} P_{bloco,RLP}^i (1 - P_{bloco,RLP})^{j-i} \end{aligned} \quad (11)$$

As expressões analíticas do *throughput* torna-se bastante complexas caso seja permitido ao protocolo RLP realizar mais de uma retransmissão.

As Figs. 1 e 2 mostram curvas de *throughput* dos protocolos RLP e TCP para alta e baixa mobilidades, respectivamente, em função relação sinal-ruído média por bit. Os parâmetros utilizados foram: $I_{RLP} = 160$ bits, $H_{RLP} = 32$ bits, $N_{RLP} = I_{RLP} + H_{RLP} = 192$ bits, $R_b = 9600$ kb/s, $I_{TCP} = 4288$ bits, $H_{TCP} = 128$ bits, $N_{TCP} = I_{TCP} + H_{TCP} = 4416$ bits e $M = \frac{N_{TCP}}{N_{RLP}} = 23$.

A Fig. 3 mostra uma comparação entre o *throughput* obtido para alta e baixa mobilidades. Usuários com baixa mobilidade apresentam um ganho de relação energia média de bit por ruído da ordem de 12 dB em relação aos usuários com alta mobilidade. A partir disso, pode-se concluir que em transmissão de dados por um canal com desvanecimento correlacionado, a utilização de circuitos que façam

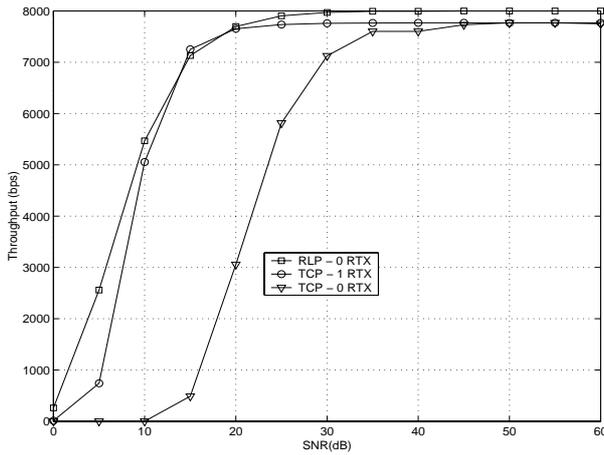


Figura 1: *Throughput* dos protocolos RLP e TCP para alta mobilidade.

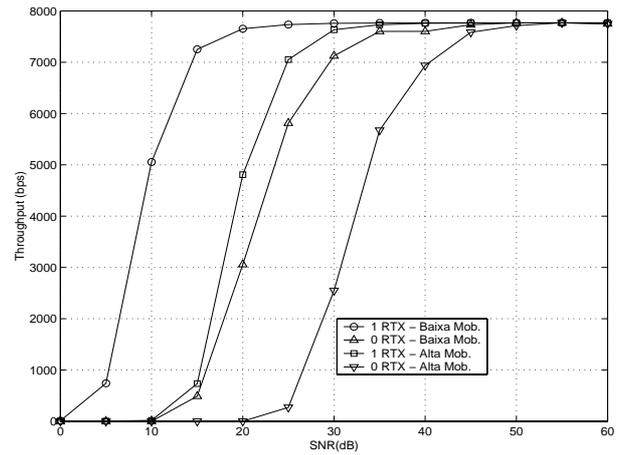


Figura 3: Comparação do *throughput* do protocolo TCP para baixa e alta mobilidades.

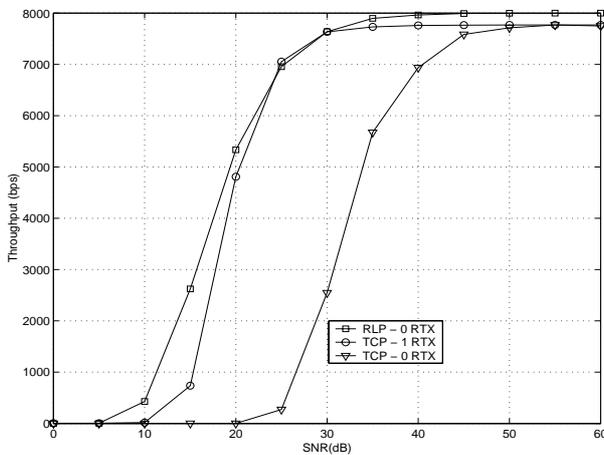


Figura 2: *Throughput* dos protocolos RLP e TCP para baixa mobilidade.

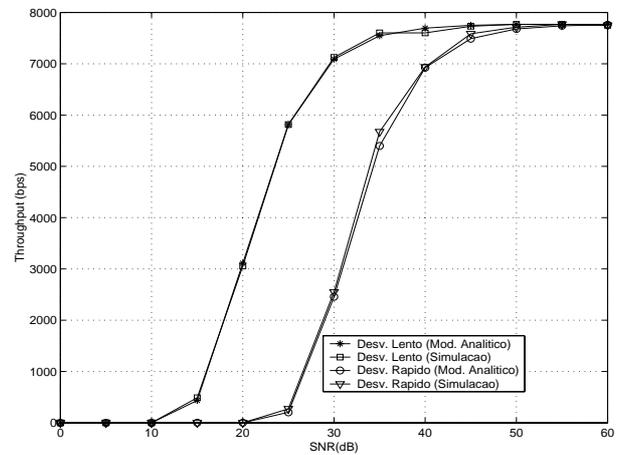


Figura 4: *Throughput* do protocolo RLP sem retransmissão.

um entrelaçamento dos dados não é recomendado, pois o entrelaçamento torna decorrelacionado o desvanecimento que ataca usuários com baixa mobilidade, o que é uma característica de usuários de alta mobilidade.

5. MODELO USADO NA SIMULAÇÃO

Neste trabalho utiliza-se o modelo apresentado por [2] para modelar o desvanecimento que ataca os pacotes RLP num ambiente de comunicações sem fio.

A Fig. (4) apresenta uma comparação entre o resultado em simulação e as expressão analítica (8) para o *throughput* do protocolo RLP.

Já na Fig. (5) compara-se o resultado da simulação e a expressão analítica (9) para o *throughput* do protocolo TCP.

Mostra-se na Fig. (6) o comportamento do *throughput* do

protocolo TCP, com 1 retransmissão na camada RLP, em função da velocidade do móvel.

6. DIVERSIDADE

Um maior ganho de relação sinal-ruído pode ser conseguido através da utilização de diversidade.

Dentre as técnicas de diversidade existentes o combinador linear "maximal-ratio" apresenta o melhor desempenho de modo a otimizar a relação sinal-ruído total.

A melhor técnica de combinação linear que pode ser adotada é pela utilização de um combinador denominado *maximal-ratio* [1]. Em canais AWGN, a probabilidade de erro de bit também é dada por (1), porém com $\gamma_b = \sum_{i=1}^L \alpha_i^2 \frac{E_b}{N_0}$, onde L é a ordem da diversidade.

Para um canal em que o desvanecimento α é plano e lento, pode-se escrever a fdp de γ_b como [1]:

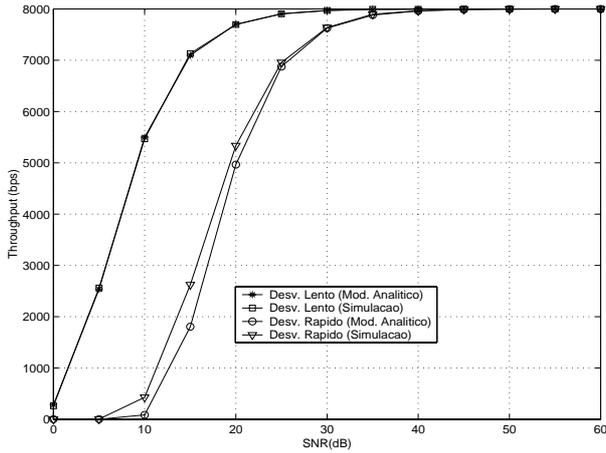


Figura 5: *Throughput* do protocolo TCP sem retransmissão.

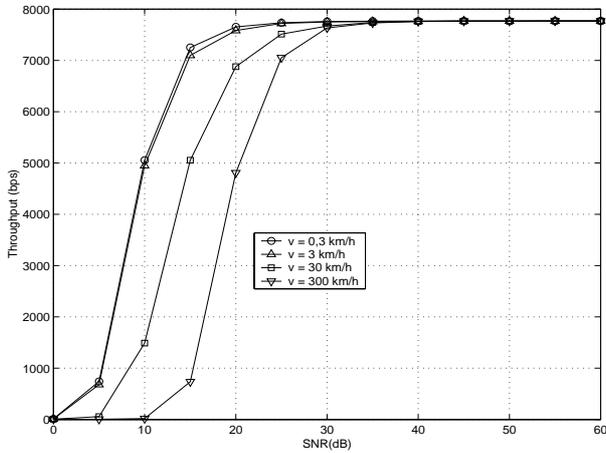


Figura 6: *Throughput* do protocolo TCP com 1 retransmissão na camada RLP.

$$p(\gamma_b) = \frac{1}{(L-1)! (\overline{\gamma_b}/L)^L} \gamma_b^{L-1} \exp\left(-\frac{\gamma_b}{(\overline{\gamma_b}/L)}\right) \quad (12)$$

onde $\overline{\gamma_b} = 2\sigma^2 L \frac{E_b}{N_0}$. Além disso, foi suposto que o valor quadrático médio do desvanecimento em todos os percursos do esquema com diversidade é o mesmo, ou seja, $\overline{\alpha_i^2} = 2\sigma^2$.

A probabilidade de erro de bit média (13) pode ser calculada pelo descondicionamento da probabilidade de erro de bit em um canal AWGN (1) pela fdp da relação sinal-ruído (12) [1]. Assim,

$$P_b = \left[\frac{1}{2} \left(1 - \sqrt{\frac{\overline{\gamma_b}}{\overline{\gamma_b} + L}} \right) \right]^L \sum_{i=0}^{L-1} \binom{L-1+i}{i} \times \left[\frac{1}{2} \left(1 + \sqrt{\frac{\overline{\gamma_b}}{\overline{\gamma_b} + L}} \right) \right]^i \approx \binom{2L-1}{L} \left(\frac{1}{4\overline{\gamma_b}/L} \right)^L \text{ para } \frac{\overline{\gamma_b}}{L} \gg 1 \quad (13)$$

Substituindo (13) em (5) tem-se a probabilidade de erro de bloco para alta mobilidade:

$$P_{bloco} = 1 - \left\{ 1 - \left[\frac{1}{2} \left(1 - \sqrt{\frac{\overline{\gamma_b}}{\overline{\gamma_b} + L}} \right) \right]^L \times \sum_{i=0}^{L-1} \binom{L-1+i}{i} \left[\frac{1}{2} \left(1 + \sqrt{\frac{\overline{\gamma_b}}{\overline{\gamma_b} + L}} \right) \right]^i \right\}^n \approx n \binom{2L-1}{L} \left(\frac{1}{4\overline{\gamma_b}/L} \right)^L \text{ para } \frac{\overline{\gamma_b}}{L} \gg 1 \quad (14)$$

Substituindo (1) em (6) e descondicionando-se pela fdp da relação sinal-ruído do sistema com diversidade, tem-se a probabilidade de erro de bloco para baixa mobilidade:

$$P_{bloco} = \int_0^\infty \left\{ 1 - \left[1 - Q(\sqrt{2\gamma_b}) \right]^n \right\} \times \frac{1}{(L-1)! (\overline{\gamma_b}/L)^L} \gamma_b^{L-1} \exp\left(-\frac{\gamma_b}{(\overline{\gamma_b}/L)}\right) d\gamma_b \quad (15)$$

As Fig. 7 e 8 ilustram, respectivamente, o *throughput* do protocolo TCP para alta e baixa mobilidades, parametrizado pela ordem da diversidade e sem retransmissões do protocolo RLP. Como esperado, a diversidade proporciona ganhos substanciais de relação sinal-ruído.

A Fig. 9 apresenta uma comparação do *throughput* do protocolo TCP, para alta e baixa mobilidades, em função da ordem de diversidade e sem retransmissões do protocolo RLP.

7. CONCLUSÕES

O cálculo do *throughput* para protocolos RLP/TCP para modulação BPSK foi realizado considerando um código com detecção ideal, para casos de baixa e alta mobilidades, com uma ou nenhuma retransmissão no protocolo RLP, e com uso de diversidade sem retransmissão do protocolo RLP. Verificou-se que não é aconselhável a utilização de entrelaçamento em transmissão de dados por um canal com desvanecimento correlacionado, pois o ganho de relação

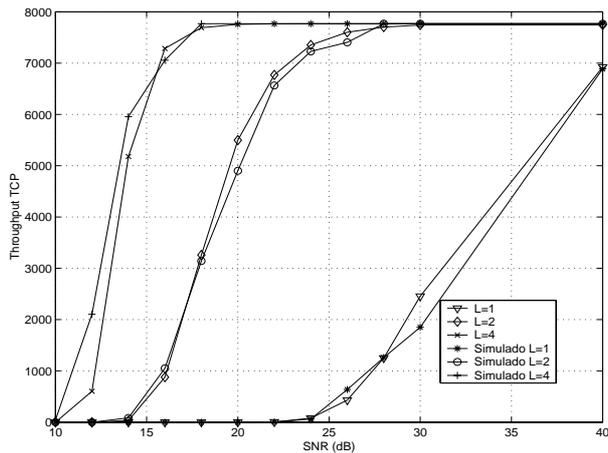


Figura 7: *Throughput* do protocolo TCP para alta mobilidade parametrizado pela ordem de diversidade.

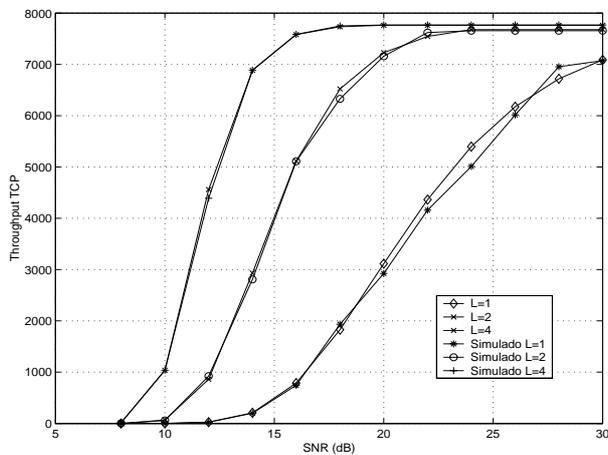


Figura 8: *Throughput* do protocolo TCP para baixa mobilidade parametrizado pela ordem de diversidade.

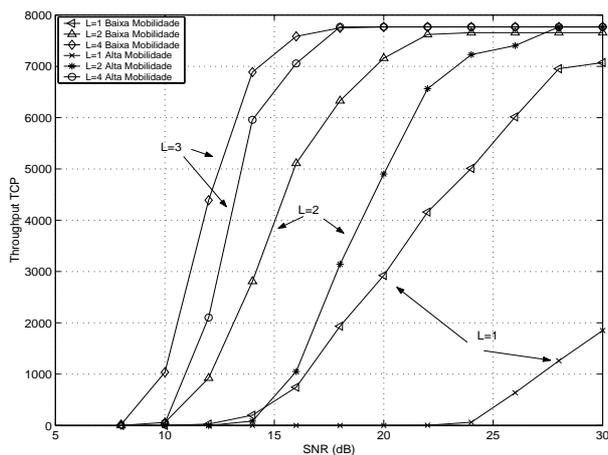


Figura 9: *Throughput* do protocolo TCP para baixa e alta mobilidades parametrizado pela ordem de diversidade

sinal-ruído é da ordem de 12 dB para o *throughput* em baixa mobilidade (maior correlação dos dados) sobre o de alta mobilidade. Considerando que o número médio de surtos de erro seja o mesmo para alta e baixa mobilidades, mostra-se que o *throughput* dos protocolos RLP e TCP para alta mobilidade é sempre pior que para baixa mobilidade.

8. AGRADECIMENTOS

Este trabalho teve o apoio do CNPq, da CAPES, da FAPESP e do Convênio Ericsson/UNICAMP.

9. REFERENCES

- [1] J. G. Proakis - "Digital Communications", 3rd Edition, McGraw-Hill, 1995.
- [2] W. C. Jakes, Ed., "Microwave Mobile Communications". New York: Wiley, 1974 .
- [3] A. Chockalingam, G. Bao - "Performance of TCP/RLP Protocol Stack on Correlated Fading DS-CDMA Wireless Link", *IEEE Trans. on Vehic. Techn.*, Vol. 49, pp. 28-33, Jan. 2000.
- [4] S. Lin, D. Costello Jr., "Error Coding Control: Fundamentals and Applications", Prentice-Hall, 1983.