

# Desempenho do protocolo TCP em sistemas de comunicação sem fio CDMA usando estratégias de correção de erro FEC e RLP

Gonzalo Fernando Olmedo Cifuentes, Celso de Almeida e Renato Baldini

**Resumo**—Neste artigo a vazão de dados e o atraso médio normalizados são obtidos para o Controle de Transmissão (TCP) considerando o enlace reverso de um sistema celular CDMA, constituído por múltiplas células. São analisadas e comparadas três estratégias de controle de erros. A primeira estratégia é baseada no protocolo de enlace de rádio (RLP). A segunda estratégia usa códigos corretores de erros (FEC) na camada de enlace. Para esta estratégia são comparados dois tipos de codificadores: convolucionais e turbo. A terceira estratégia é um método híbrido, que usa codificação FEC na camada RLP.

**Palavras-Chave**—CDMA, Vazão de dados, TCP, ARQ, RLP, FEC, códigos convolucionais e códigos turbo.

**Abstract**—In this article, the normalized throughput and average delay for the Transport Control Protocol (TCP) at the reverse link of multicellular CDMA systems are obtained. Three TCP error control strategies are evaluated and compared. The first strategy is based on the radio-link-protocol (RLP). The second strategy uses forward-error-control (FEC) procedure at the radio link layer. In this case, two kinds of FEC are employed: convolutional and turbo coding. The third one is a hybrid between the first and second strategies with encoding at the RLP layer.

**Keywords**—CDMA, Throughput, Average Delay, TCP, ARQ, RLP, FEC, convolutional codes and turbo codes.

## I. INTRODUÇÃO

A tecnologia de comunicações sem fio para sistemas celulares digitais tem sido aprimorada nos últimos anos com a finalidade de alcançar plenamente os objetivos da terceira geração. Um dos quesitos mais importantes é o de permitir os serviços de comunicação da Internet, dados e multimídia, que requerem alta vazão de dados, em comparação com os serviços de voz. A Internet é baseada na arquitetura TCP/IP (*Transport Control Protocol/Internet Protocol*), e foi projetada para ser usada em redes fixas, onde a taxa de erro de bits é muito baixa e o congestionamento é a principal causa de perdas de pacotes. As características do canal de comunicações sem fio produzem uma alta taxa de erro de bits e como consequência uma alta perda de pacotes. Ao ser usado diretamente, o protocolo TCP associará este problema ao congestionamento, desse modo, haverá uma degradação significativa da vazão de dados.

As comunicações sem fio usam a camada de enlace de dados, que neste artigo provê três métodos de controle de erros: ARQ (*Automatic Repeat Request*), FEC (*Forward Error Control*), e um método híbrido formado pela combinação

dos métodos anteriores (FEC/ARQ). Na camada de enlace de dados, a técnica ARQ é encarregada do controle de erro através da retransmissão de pacotes de pequeno comprimento, reduzindo a perda de pacotes e melhorando assim o desempenho do sistema. Atualmente os modelos ARQ propostos nos padrões de terceira geração são utilizados no protocolo RLP (*Radio Link Protocol*) especificado pela norma IS-707 [1] e RLC (*Radio Link Control*) [2] para CDMA2000 e WCDMA, respectivamente.

Neste artigo é obtida a vazão de dados e o atraso médio, em que um pacote TCP é transmitido com sucesso pelo enlace reverso de um sistema CDMA, constituído por múltiplas células, e que usa modulação BPSK. Estas medidas de desempenho são avaliadas em função do carregamento do sistema CDMA. Considera-se três estratégias de controle de erros na camada de enlace de dados: RLP, FEC, e o método híbrido FEC/RLP. Na segunda e terceira estratégias é analisado o desempenho do sistema, comparando o uso dos codificadores convolucionais e turbo, especificados pelo padrão CDMA2000 [3].

O canal considerado é seletivo em frequência e por consequência é capaz de gerar múltiplos percursos, com desvanecimento do tipo Rayleigh. Além disso, um sombreamento lognormal do sinal transmitido é considerado. Consideram-se também a perda de percurso exponencial e o erro no controle de potência.

Este artigo é organizado da seguinte maneira. Na seção II são detalhadas as três estratégias de controle de erro. Na seção III são mostrados os codificadores FEC usados no padrão CDMA2000. Na seção IV são apresentadas as principais características do sistema CDMA proposto. O atraso médio e a vazão de dados para o protocolo TCP são definidos nas seções V e VI, respectivamente. Finalmente, os resultados e conclusões são apresentados nas seções VII e VIII, respectivamente.

## II. ESTRATÉGIAS DE CONTROLE DE ERRO

Para todas as estratégias considera-se que a camada TCP usa um tamanho de pacote MSS (*maximum segment size*) constante de  $N_{TCP}$  bits, constituído por  $I_{TCP}$  bits de informação e  $H_{TCP}$  bits de cabeçalho. Na modelagem matemática do sistema, a camada TCP é modelada como um código de bloco com taxa de codificação:

$$r_{TCP} \triangleq \frac{I_{TCP}}{H_{TCP} + I_{TCP}},$$

ou seja, os bits de endereçamento do cabeçalho são considerados como redundância do código.

Para enviar um arquivo de uma aplicação de  $N_{arq}$  bits são requeridos  $n_{TCP}$  pacotes TCP, onde:

$$n_{TCP} = \left\lceil \frac{N_{arq}}{I_{TCP}} \right\rceil, \quad (1)$$

onde  $\lceil x \rceil$ , representa o menor inteiro maior ou igual a  $x$ .

A primeira estratégia é ilustrada na Fig. 1, onde os  $N_{TCP}$  bits do protocolo TCP são particionados em  $n_{RLP}$  blocos do protocolo RLP de comprimento  $N_{RLP}$  bits, constituídos por  $I_{RLP}$  bits de informação e  $H_{RLP}$  bits de cabeçalho, onde:

$$n_{RLP} = \left\lceil \frac{N_{TCP}}{I_{RLP}} \right\rceil. \quad (2)$$

Na modelagem matemática do sistema, a camada RLP também é modelada como um código de bloco com taxa de codificação:

$$r_{RLP} \triangleq \frac{I_{RLP}}{H_{RLP} + I_{RLP}}.$$

O modelo de controle de erros na camada RLP considera a retransmissão dos blocos RLP errados somente após o término da transmissão do pacote TCP. Dependendo do número máximo permitido de retransmissões na camada RLP, se depois da primeira retransmissão ainda existirem blocos com erro, estes serão retransmitidos novamente, e assim sucessivamente. Se após um número máximo de tentativas de retransmissões dos blocos RLP, o pacote TCP ainda se apresentar corrompido, todo o pacote TCP será retransmitido [4]. A camada RLP usa confirmação de blocos não-confirmados, NAKs, para solicitar sua retransmissão.

A segunda estratégia que é ilustrada na Fig. 2 usa na camada de enlace de rádio códigos corretores de erro FEC que neste trabalho consideraremos do tipo convolucional ou turbo. O modelo de controle de erros na camada TCP para esta estratégia considera a retransmissão sucessiva dos pacotes TCP errados até que o pacote seja recebido corretamente.

A terceira estratégia é ilustrada na Fig. 3, que é uma estratégia híbrida, ou seja, combinação das duas anteriores, onde os  $N_{TCP}$  bits provenientes da camada TCP são particionados em  $n_{RLP}$  blocos RLP e cada bloco RLP é codificado antes de ser transmitido.

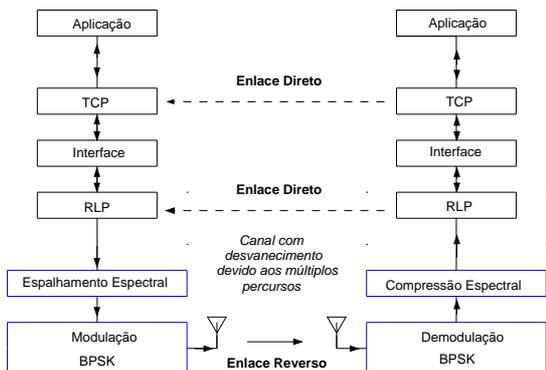


Fig. 1. Estratgia 1: Pilha de protocolos usando o protocolo RLP.

[htb]

TABELA I  
CÓDIGOS CONVOLUCIONAIS USADOS NO PADRÃO CDMA2000.

taxa de código $r_c$	Comprimento de restrição $K$	$d_{free}$	vetores geradores			
			$g^{(0)}$	$g^{(1)}$	$g^{(2)}$	$g^{(3)}$
$\frac{1}{2}$	9	12	753	561	-	-
$\frac{1}{3}$	9	18	557	663	711	-
$\frac{1}{4}$	9	24	765	671	513	473

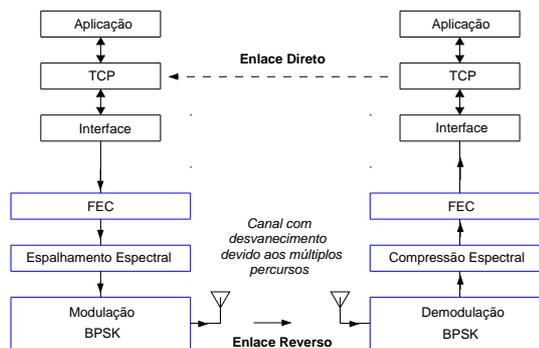


Fig. 2. Estratgia 2: Pilha de protocolos usando FEC.

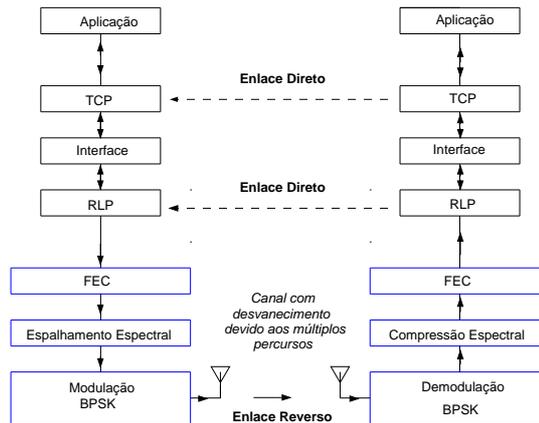


Fig. 3. Estratgia 3: Pilha de protocolos usando o método híbrido FEC/RLP.

### III. CODIFICADORES FEC PARA CDMA2000

Tanto para o enlace reverso, como para o enlace direto, os codificadores convolucionais especificados no padrão CDMA2000 possuem comprimento de restrição  $K = 9$  e taxas de código  $r_c = \frac{1}{2}, \frac{1}{3}$  e  $\frac{1}{4}$ . Os vetores geradores para estes codificadores são dados em notação octal na Tab. I. Para o processo de decodificação é suposto um processo de decodificação suave usando o algoritmo de Viterbi [5].

Para o enlace reverso, o codificador turbo especificado no padrão CDMA2000 usa dois codificadores convolucionais recursivos sistemáticos (CRS) idênticos de taxa  $r_{CRS} = \frac{1}{3}$  concatenados em paralelo, com um entrelaçador antes do segundo codificador CRS.

A matriz geradora que define as saídas de cada codificador CRS é dada por:

$$G(D) = \left[ 1, \frac{1 + D + D^3}{1 + D^2 + D^3}, \frac{1 + D + D^2 + D^3}{1 + D^2 + D^3} \right] \quad (3)$$

ou  $G = [1, \frac{15}{13}, \frac{17}{13}]$  em notação octal.

Para o codificador turbo, o padrão CDMA2000 define taxas de código  $r_c = \frac{1}{2}, \frac{1}{3}$  ou  $\frac{1}{4}$ , obtidas pelo punctionamento e multiplexação dos bits de paridade, das saídas dos codificadores CRSs [3].

Para este tipo de código é usado o processo de decodificação iterativo, baseado no algoritmo BCJR [6], considerando as características do canal de comunicação proposto neste artigo [7].

#### IV. SISTEMA CDMA

A análise de desempenho é feita no enlace reverso de uma célula escolhida dentro da estrutura multicelular, denominada célula alvo, onde é suposto um servidor na estação-rádio-base (ERB), que se encontra recebendo os dados de informação de um determinado usuário, denominado usuário alvo.

Os usuários situados no interior da célula alvo são controlados pela ERB situada no centro desta célula, onde a ERB procura compensar a perda de percurso exponencial e o sombreamento lognormal do canal, através de um mecanismo de controle de potência. O mecanismo de controle de potência não funciona idealmente, e seu erro é modelado por uma variável lognormal com função densidade de probabilidade (FDP) dada por:

$$p(\lambda) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_\lambda} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln(\lambda)-\mu_\lambda}{\sigma_\lambda}\right)^2}, \quad (4)$$

onde  $\mu_\lambda$  e  $\sigma_\lambda$  são a média e o desvio padrão logarítmicos, respectivamente. A média e o desvio padrão em dB podem ser calculados facilmente através de:  $\mu_{\lambda,dB} = \frac{10}{\ln 10}\mu_\lambda$  e  $\sigma_{\lambda,dB} = \frac{10}{\ln 10}\sigma_\lambda$ , respectivamente. Tipicamente, o erro no controle de potência é caracterizado por:  $\mu_{\lambda,dB} = 0$  dB e  $\sigma_{\lambda,dB} = 1$  dB. O valor do erro quadrático médio no controle de potência é dado por  $\bar{\lambda}^2 = e^{2\sigma_\lambda^2}$  [8].

Os usuários externos da célula alvo apresentam, além do erro no mecanismo de potência, um sombreamento lognormal, pois estes usuários são controlados pela ERB que apresentar maior nível de potência recebida e não necessariamente pela ERB mais próxima.

A interferência média produzida pelas outras células, normalizada pelo número de usuários  $N$  é  $\frac{mI}{N} \simeq 0,89$  para 18 células, usando o desvio padrão do sombreamento lognormal  $\sigma_{s,dB} = 8$  dB, e o expoente de perda de percurso  $\zeta = 4$  [8].

O canal é seletivo em frequência, pois a largura de banda do canal transmitido é suposta ser muito maior que a largura de banda de coerência do canal, e deste modo tem-se  $L > 1$  componentes de múltiplos percursos. Um receptor do tipo Rake é usado com o objetivo de coletar a energia dos  $L$  percursos.

O desvanecimento é modelado como uma variável aleatória do tipo Rayleigh  $a_l$ , com parâmetro  $\sigma_{a_l}$ , e sua FDP é dada por:

$$p_{a_l}(a_l) = \frac{a_l}{\sigma_{a_l}^2} e^{-\frac{a_l^2}{2\sigma_{a_l}^2}}, \quad (5)$$

com valor médio e valor quadrático médio dados por  $\bar{a}_l = \sqrt{\frac{\pi}{2}}\sigma_{a_l}$  e  $a_l^2 = 2\sigma_{a_l}^2$ , respectivamente.

Considerando que os sistema CDMA usa modulação BPSK, a probabilidade de erro média por bit codificado é dada por [9]:

$$P_{bc} = E_\lambda [P_{bc}(e|\lambda)] = \int_0^\infty P_{bc}(e|\lambda)p_\lambda(\lambda)d\lambda, \quad (6)$$

onde  $P_{bc}(e|\lambda)$  é a probabilidade de erro média por bit codificado condicionada ao erro de controle de potência, e é dada por [5]:

$$\begin{aligned} P_{bc}(e|\lambda) &= E_a [P_{bc}(e|a, \lambda)] \\ &= \left(\frac{1-\nu}{2}\right)^L \sum_{i=0}^{L-1} \binom{L-1+i}{i} \left(\frac{1+\nu}{2}\right)^i \end{aligned} \quad (7)$$

onde

$$\nu = \sqrt{\frac{E_a[\gamma_{bc}]}{E_a[\gamma_{bc}] + L}}, \quad (8)$$

e

$$E_a[\gamma_{bc}] = \frac{\lambda^2 e^{-2\sigma_\lambda^2} r_{cod}}{\frac{2}{3} \left(\frac{N-1}{G} + \frac{m_f}{G}\right) + \left(\frac{E_b}{N_0}\right)^{-1}}, \quad (9)$$

onde  $\frac{E_b}{N_0}$  e  $\gamma_{bc}$  representam a relação sinal-ruído e a relação sinal-ruído-mais-interferência por bit codificado (SINR), respectivamente.  $G = \frac{R_c}{R_b}$ , é o ganho de processamento, onde  $R_c$  é a taxa de chips e  $R_b$  a taxa de bits da camada de aplicação,  $r_{cod}$  representa a taxa total do conjunto de codificadores definidos pelas camadas TCP, RLP e FEC, dependendo do modelo usado, conforme mostra a Tab. II. A variável  $a = \sum_{l=1}^L a_l^2$  é uma variável aleatória chi-quadrada central com FDP dada por:

$$p_a(a) = \frac{1}{(L-1)!(\bar{a}/L)^L} a^{L-1} e^{-\frac{a}{\bar{a}}}, \quad (10)$$

onde  $\bar{a} = L\bar{a}_l^2$  é a média de  $a$ .

TABELA II

TAXA DE CODIFICAÇÃO  $r_{cod}$  PARA AS TRÊS ESTRATÉGIAS DE CONTROLE DE ERRO.

Estratégia	Método de controle de erros	$r_{cod}$
1	RLP	$r_{TCP}r_{RLP}$
2	FEC	$r_{TCP}r_c$
3	FEC/RLP	$r_{TCP}r_{RLP}r_c$

#### V. ATRASO MÉDIO DE PACOTES TCP

Considerando que o controle de erro na camada TCP usa retransmissões consecutivas, o atraso de pacotes TCP pode ser modelado como uma variável aleatória geométrica, onde o atraso médio de pacotes TCP é dado por [4]:

$$\bar{T}_{TCP} = \frac{T_{TCP}}{1 - P_{pacote,TCP}}, \quad (11)$$

sendo  $P_{pacote,TCP}$  a probabilidade de se errar um pacote TCP, e  $T_{TCP}$  o tempo gasto para se transmitir um pacote TCP com sucesso.

### A. Estratégia 1

Na primeira estratégia, o valor de  $T_{TCP}$  depende da probabilidade de erro de blocos RLP,  $P_{bloco,RLP}$ , e do número máximo de retransmissões,  $r$ , usado na camada RLP, e é dado por:

$$T_{TCP} = \frac{1 - P_{bloco,RLP}^{r+1}}{1 - P_{bloco,RLP}} \tau_{TCP,min}, \quad (12)$$

onde  $\tau_{TCP,min}$  é o menor intervalo de tempo em que um pacote TCP pode ser transmitido corretamente, dado por:

$$\tau_{TCP,min} = \frac{I_{TCP}}{R_b G_c} + \tau_p, \quad (13)$$

onde  $G_c = r_{cod}G$  é o ganho de processamento do bit codificado e  $\tau_p$  é o tempo de propagação.

Se na camada RLP forem usadas no máximo  $r$  retransmissões,  $P_{pacote,TCP}$  é dada por [4]:

$$P_{packet,TCP} = \sum_{j_0=1}^{n_{RLP}} \binom{n_{RLP}}{j_0} P_{block,RLP}^{j_0} (1 - P_{block,RLP})^{n_{RLP}-j_0} \times \sum_{j_1=1}^{j_0} \binom{j_0}{j_1} P_{block,RLP}^{j_1} (1 - P_{block,RLP})^{j_0-j_1} \times \dots \times \sum_{j_r=1}^{j_{r-1}} \binom{j_{r-1}}{j_r} P_{block,RLP}^{j_r} (1 - P_{block,RLP})^{j_{r-1}-j_r}, \quad (14)$$

Usando (12) em (11) e normalizando pelo tempo mínimo  $\tau_{TCP,min}$ , obtém-se o atraso médio de TCP normalizado como:

$$\overline{\tau_{TCP,N}} = \frac{1 - P_{bloco,RLP}^{r+1}}{(1 - P_{bloco,RLP})(1 - P_{pacote,TCP})}. \quad (15)$$

O termo  $P_{bloco,RLP}$  depende dentre outros fatores da velocidade do móvel  $v_M$ . Para uma alta mobilidade, a amplitude do desvanecimento é decorrelacionada a cada símbolo. Assim, a probabilidade de erro  $P_{bloco,RLP}$  pode ser avaliada por:

$$P_{bloco,RLP} = 1 - (1 - P_{bc})^{N_{RLP}}, \quad (16)$$

onde  $P_{bc}$  é a probabilidade de erro por bit codificado, obtida em (6). Se o sistema opera em baixa mobilidade, vamos considerar que a amplitude do desvanecimento é constante para todos os bits do bloco. Assim:

$$P_{bloco,RLP} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \{1 - [1 - P_{bc}(e|a, \lambda)]^{n_{RLP}}\} da d\lambda, \quad (17)$$

### B. Estratégia 2

Para a segunda estratégia, o valor de  $T_{TCP}$  é dado por:

$$T_{TCP} = \tau_{TCP,min} = \frac{I_{TCP}}{R_b r_c G_c} + \tau_p + \tau_{dec}, \quad (18)$$

onde  $\tau_{dec}$  é o intervalo de tempo usado no processo de decodificação.

Usando (12) e normalizando pelo tempo mínimo  $\tau_{TCP,min}$ , obtém-se o atraso médio de TCP normalizado como:

$$\overline{\tau_{TCP,N}} = \frac{1}{1 - P_{pacote,TCP}}, \quad (19)$$

onde o valor de  $P_{pacote,TCP}$  depende do tipo de codificador usado.

Com o objetivo de que os algoritmos de decodificação convolucional e turbo usados nesta e na próxima estratégia garantam maior capacidade de correção de erro, é considerado no transmissor e no receptor um entrelaçador e um desentrelaçador, respectivamente, com característica totalmente aleatória e profundidade infinita. Neste caso, o canal apresenta desvanecimento não-correlacionado entre os bits, independentemente da velocidade do móvel.

Quando é usada codificação turbo,  $P_{pacote,TCP}$  é obtida por simulação usando o algoritmo de decodificação BCJR [6], [7], visto que as expressões analíticas obtidas para baixa relação SINR não são precisas. Para codificação convolucional, considerando um desvanecimento não-correlacionado entre os bits, a probabilidade de erro de pacote TCP é dada por:

$$P_{pacote,TCP} = 1 - (1 - P_b)^{N_{TCP}}. \quad (20)$$

onde  $P_b$  é a probabilidade de erro de bit obtida após o algoritmo de Viterbi com decisão suave e é dada por [5]:

$$P_b \leq \frac{1}{k_c} \sum_{d=d_{free}}^{\infty} \beta_d P_b(d), \quad (21)$$

onde  $k_c$  é o número de entradas ao codificador,  $\beta_d$  são os pesos do codificador, e seus valores podem ser obtidos em [10]. O valor de  $P_b(d)$  é determinado pela probabilidade de se selecionar uma seqüência-código incorreta, que difere da seqüência-código correta em  $d$  posições, e é dada por [5]:

$$P_b(d) = P_{bc}^d \sum_{k=0}^{d-1} \binom{d-1+k}{k} (1 - P_{bc})^k, \quad (22)$$

onde o valor de  $P_{bc}$  é dada por (6).

### C. Estratégia 3

Para esta estratégia pode-se mostrar facilmente que o atraso médio normalizado de TCP é dado pela expressão (15), onde o valor de  $P_{pacote,TCP}$  é dado por (14), e  $P_{bloco,RLP}$  depende do tipo de codificador usado.

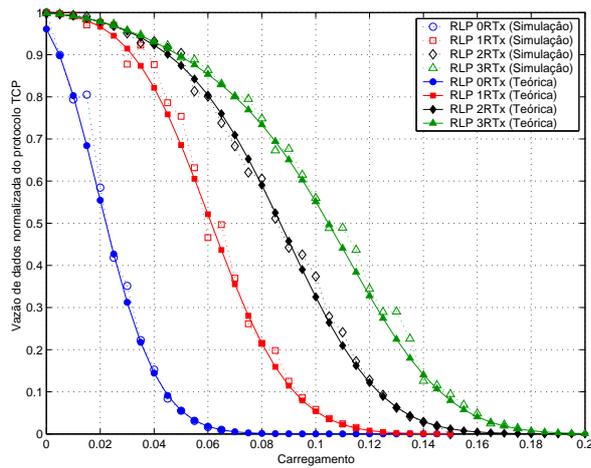
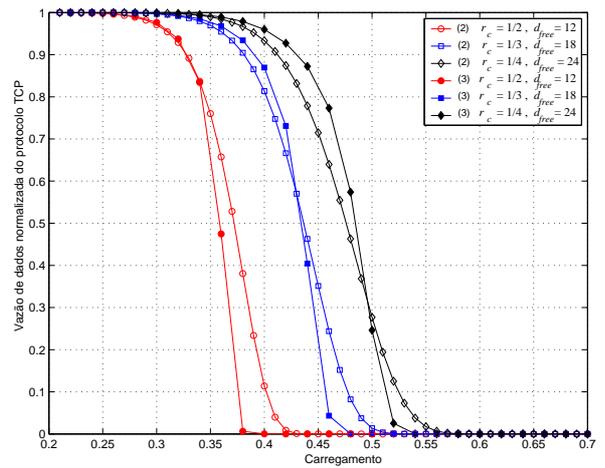
Quando é usada codificação turbo,  $P_{bloco,RLP}$  é obtida por simulação usando o algoritmo de decodificação BCJR. Para codificação convolucional, considerando um desvanecimento não-correlacionado entre os bits, a probabilidade de erro de bloco RLP é dada por:

$$P_{bloco,RLP} = 1 - (1 - P_b)^{N_{RLP}}. \quad (23)$$

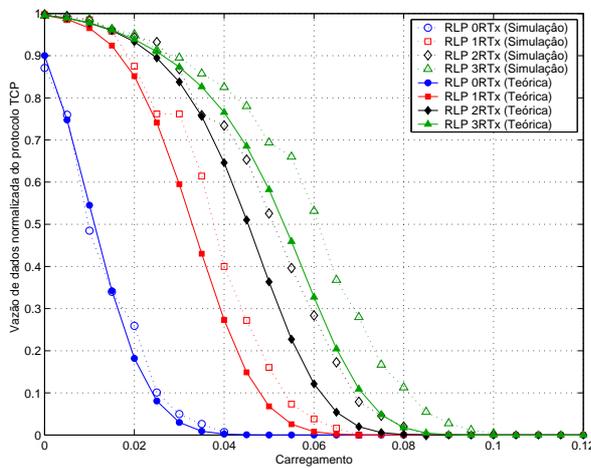
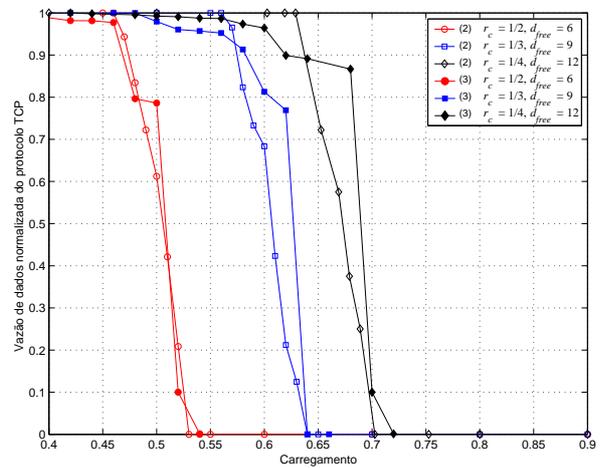
onde  $P_b$  é a probabilidade de erro de bit obtida ao usar o algoritmo de decodificação suave de Viterbi, dada por (21).

## VI. VAZÃO DE DADOS

A vazão de dados para o protocolo TCP é definida como a taxa de transmissão de bits de informação, recebidos com sucesso na camada TCP, e dada pela relação entre o número total de bits de informação recebidos com sucesso e o tempo total usado na transmissão. Existe uma relação inversamente proporcional entre o atraso médio normalizado pelo tempo mínimo em que o pacote TCP pode ser transmitido e a vazão de dados normalizada pela taxa de informação  $R_b$  e pelo ganho


 (a) Baixa mobilidade,  $f_c = 2$  GHz,  $v_M = 1$  km/h.


(a) Usando códigos convolucionais.


 (b) Alta mobilidade,  $f_c = 2$  GHz,  $v_M = 100$  km/h


(b) Usando códigos turbo.

Fig. 4. Comparação da vazão de dados normalizada teórica e simulada para o protocolo TCP em função do carregamento, para (a) baixa mobilidade e (b) alta mobilidade.

Fig. 5. Comparação do desempenho obtido pela segunda (2) e terceira estratégia (3), usando códigos corretores de erro FEC (a) convolucionais e (b) turbo. São consideradas 3 retransmissões de RLP e 5 iterações de decodificação turbo.

de processamento de bit codificado  $G_c$ . Assim a expressão da vazão normalizada para o protocolo TCP é dada por [7]:

$$\eta_{TCP_N} = \frac{1}{\tau_{TCP_N}}. \quad (24)$$

## VII. RESULTADOS

Nesta seção são apresentadas somente as curvas obtidas da vazão de dados normalizada para o protocolo TCP, já que o comportamento do atraso médio normalizado pode ser facilmente obtido, conforme o apresentado na seção anterior.

No sentido de se fazer uma comparação justa para as três estratégias, todos os resultados foram obtidos considerando o ganho de processamento do sinal de informação  $G$  constante.

Para a decodificação turbo, na segunda e terceira estratégias foram usadas 5 iterações no algoritmo BCJR. Isto se deve por ter sido observado, através de simulação, que para este

número de iterações o tempo total de decodificação é similar ao tempo gasto pelo algoritmo de Viterbi, usado no sistema de decodificação convolucional.

Os resultados foram obtidos usando os parâmetros dados na Tab. III e foram avaliados em função do "carregamento do sistema", definido como:  $\frac{N-1}{G}$ . Para a camada TCP é considerado o formato de cabeçalho TCP/IP comprimido dado em [11].

Na camada RLP é considerado um máximo de 3 retransmissões, pois para um número maior de retransmissões não se obtém um aumento significativo no desempenho do sistema [4], [12].

A Fig. 4 apresenta as curvas da vazão normalizada de dados para o protocolo TCP em função do carregamento do sistema, usando a primeira estratégia. São mostrados os resultados, tanto para baixa (a), como para alta mobilidade

TABELA III  
PARÂMETROS USADOS.

Parâmetro	Valor	Parâmetro	Valor
$L$	3	$N_{TCP}$	4.312 bits
$\frac{E_b}{N_0}$	20 dB	$I_{TCP}$	4.288 bits
$\zeta$	4	$H_{TCP}$	24 bits
$\sigma_{s,dB}$	8 dB	$N_{RLP}$	192 bits
$\frac{m}{N}$	0,89 dB	$I_{RLP}$	160 bits
$\sigma_{\lambda,dB}$	1 dB	$H_{RLP}$	32 bits
$G$	128	$N_{arq}$	30 kbytes
$R_b$	9.600 bits/s	$n_{RLP}$	27 blocos
carregamento	$\frac{N-1}{G}$	$n_{TCP}$	56 pacotes

(b), parametrizadas pelo número de retransmissões na camada RLP. Os resultados foram obtidos, tanto em forma teórica, como também por simulação. Para a simulação foi usado o modelo de Jakes [13], com frequência de portadora de  $f_c = 2$  GHz e velocidade do móvel  $v_M = 1$  e 100 km/h, para baixa e alta mobilidade, respectivamente.

Pode-se observar que o controle de erro da camada RLP vai melhorando com o número de retransmissões, incrementando a vazão normalizada de dados, diminuindo assim o atraso médio utilizado para transmitir um pacote, e permitindo assim um maior carregamento do sistema.

Quanto menor é a velocidade do móvel, melhor é o desempenho do sistema, pois se a velocidade do móvel é baixa, a amplitude do desvanecimento varia lentamente, o que produz surtos de erros, que podem estar concentrados em um só bloco RLP. Isto favorece um menor número de retransmissões.

A Fig. 5 apresenta as curvas da vazão normalizada de dados para o protocolo TCP em função do carregamento do sistema para a segunda e terceira estratégias, usando (a) códigos convolucionais e (b) códigos turbo, parametrizadas pelas respectivas taxas de código e distâncias livres de Hamming,  $d_{free}$ , definidas para o padrão CDMA2000. Para a terceira estratégia, os resultados, são apresentados usando 3 retransmissões de RLP.

As duas últimas estratégias apresentaram melhor desempenho quando comparadas com a primeira estratégia, conseguindo maior carregamento do sistema, para uma mesma vazão.

Comparando o desempenho obtido, com códigos convolucionais ou turbo, em uma mesma estratégia, pode-se observar que os códigos turbo permitem um maior carregamento do sistema.

Tanto para os códigos convolucionais como para os turbo, o produto  $r_c d_{free}$  é constante e pode-se observar que o codificador com maior  $d_{free}$  apresenta o melhor desempenho. Isto é devido a que, um maior  $d_{free}$  apresenta maior diversidade para canais com desvanecimento [5].

Comparando a estratégia dois com a estratégia três, quando são usados códigos turbo, nota-se que para 3 retransmissões do protocolo RLP, a estratégia 3 permite maiores valores de carregamento. Por outro lado, para menores valores de carregamento, a estratégia 2 é superior. Para códigos convolucionais, o resultado é o inverso.

## VIII. CONCLUSÕES

A primeira estratégia mostrou-se melhor para baixa mobilidade, pois surtos de erros podem estar concentrados em um só bloco de RLP, requerendo assim um menor número de retransmissões. Isto indica que não seria recomendável usar um entrelaçador de canal para esta estratégia.

Mostrou-se que as estratégias 2 e 3 no geral apresentaram melhor desempenho ao serem comparadas com a estratégia 1, permitindo maior carregamento do sistema.

Nas estratégias 2 e 3 comprovou-se a melhora de desempenho do sistema devido ao uso de códigos turbo. Além disso, foram comparados codificadores, tanto convolucionais, como turbo com diferentes taxas de codificação porém mesmo produto  $r_c d_{free}$ , mostrando que existe uma melhora no desempenho para codificadores com maior  $d_{free}$ .

Finalmente, podemos concluir que das três estratégias analisadas, a terceira estratégia usando códigos turbo é a que consegue o maior carregamento do sistema com altos valores da vazão de dados e o menor atraso médio.

## REFERÊNCIAS

- [1] TIA/EIA/IS-707-A-2.10, "Data Service Options for Spread Spectrum Systems: Radio Link Protocol Type 3", January 2000.
- [2] Third Generation Partnership Project, "RLC Protocol Specifications (3G Ts 25.322:)", 1999.
- [3] 3GPP2 C.S0002-B, Physical Layer Standard for cdma2000 Spread Spectrum Systems Release B, April 19, 2002.
- [4] T. B. da Nóbrega, "Eficiência dos Protocolos TCP/RLP sobre Sistemas sem Fio WCDMA usando Arranjo Lineares de Antenas", Tese de Mestrado, UNICAMP, 2002.
- [5] J. Proakis, *Digital Communications*, McGraw-Hill, 3rd Ed., 1994.
- [6] C. Berrou, A. Glavieux, P. Thitimajshima, "Near Shannon limit error-correcting coding and decoding. Turbo codes," in *Proc. IEEE Int. Conf. Communications*, pp. 1064-1070, May 1993.
- [7] G. F. Olmedo, "Desempenho do protocolo TCP em sistemas de comunicação sem fio CDMA usando estratégias de correção de erro FEC e RLP", Tese de Mestrado, UNICAMP, 2003.
- [8] C. de Almeida and R. Hoefel, "On the Interference of Cellular CDMA Systems", *International Telecomm. Symposium*, Brasil, 1998.
- [9] E. Paz da Silva, "Cálculo da probabilidade de erro média de bit de sistemas CDMA em canais seletivos em frequência", Tese de Mestrado, UNICAMP, 2000.
- [10] J. Conan, "The Weight Spectra of some Short Low-Rate Convolutional Codes", *IEEE Trans. Comm.*, Vol. 32, pp. 1050-1053, September 1984.
- [11] V. Jacobson, "Compressing TCP/IP Headers for Low Speed Serial Links", *IETF RFC 1144*, February 1990.
- [12] A. Chockalingam and G. Bao, "Performance of TCP/RLP Protocol Stack on Correlated Fading DS-CDMA Wireless Links", *IEEE Trans. Vehicular Tech.*, Vol. 49, no. 1 pp. 28-33, January, 2000.
- [13] W. Jakes, *Microwave mobile communications*, New York, NY: Wiley, 1974.