

# Avaliação da Estratégia ARQ Híbrido na Interação entre os Protocolos TCP e RLP sobre Sistemas Celulares CDMA

Márzio Geandre Rêgo, Renato Baldini Filho, Celso de Almeida

**Resumo**—Neste trabalho avalia-se o comportamento da pilha de protocolos TCP/RLP (*Transport Control Protocol/Radio Link Protocol*) utilizando a estratégia ARQ (*Automatic Repeat Request*) Híbrido no protocolo RLP sobre um enlace sem fio CDMA (*Code Division Multiple Access*). Resultados, analíticos e simulados, mostram que o uso da técnica ARQ Híbrido melhora o desempenho do sistema. Vazão de dados e atraso médio de segmentos TCP são os parâmetros de desempenho analisados no enlace reverso de um sistema CDMA multicelular, com usuários distribuídos uniformemente em uma célula.

**Palavras-Chave**—CDMA, TCP, RLP, ARQ Híbrido, Vazão de Dados, Atraso Médio.

**Abstract**—In this work the performance of TCP/RLP (*Transport Control Protocol/Radio Link Protocol*) protocol stack using the Hybrid ARQ (*Automatic Repeat Request*) strategy in the RLP protocol is evaluated on a CDMA (*Code Division Multiple Access*) wireless link. Analytical and simulated results show that the use of the Hybrid ARQ improves the system performance. Throughput and average delay of the TCP segments are the performance parameters analyzed on the reverse link of the multicellular CDMA system, with users uniformly distributed in a cell.

**Keywords**—CDMA, TCP, RLP, Hybrid ARQ, Throughput, Average Delay.

## I. INTRODUÇÃO

Os sistemas de comunicação móvel celular apresentaram um crescimento vertiginoso nas últimas décadas, ao ponto de atualmente superarem os acessos fixos convencionais. Ao lado dos rápidos avanços na área de comunicações sem fio, a popularização da Internet atinge números cada vez maiores. Nesse cenário, o fornecimento de serviços de dados para aplicações como correio eletrônico, navegação na *Web*, transferência de arquivos, acesso remoto, etc., sobre redes sem fio vem ganhando cada vez mais importância [1].

O protocolo TCP (*Transport Control Protocol*), um protocolo de transporte que faz parte da *suíte IP (Internet Protocol)*, é o protocolo utilizado por todas essas aplicações. No entanto, o protocolo TCP foi projetado para redes fixas, onde as taxas de erro do canal são baixas e as perdas de segmentos são decorrentes principalmente do congestionamento na rede. Em canais sem fio, onde as taxas de erro são altas, o desempenho do protocolo TCP torna-se significativamente degradado, devido à perda de segmentos e aumento dos atrasos.

Márzio Geandre Rêgo, Renato Baldini Filho, Celso de Almeida, Departamento de Comunicações, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação - UNICAMP, Campinas-SP, Brasil, E-mails: {geandre,baldini,celso}@decom.fee.unicamp.br. Este trabalho foi financiado pela CAPES.

A utilização de um mecanismo para reduzir as incompatibilidades entre o protocolo TCP e o ambiente sem fio torna-se imprescindível. O protocolo RLP (*Radio Link Protocol*), tem sido proposto como solução para este problema. Este protocolo é introduzido na camada de enlace, acima da camada física, e sua principal função é minimizar as perdas do protocolo TCP no ambiente sem fio através da subdivisão do segmento TCP em segmentos menores. Uma técnica de controle de erros, chamada ARQ (*Automatic Repeat Request*) é responsável pelo controle de erros através de retransmissões de pacotes no protocolo RLP.

No entanto, a estratégia ARQ não apresenta uma boa eficiência em canais onde as taxas de erro são altas. Nestes canais ocorrem um grande número de retransmissões, conseqüentemente diminuindo o desempenho do sistema. Nesse caso, a combinação da técnica FEC (*Forward Error Correction*) com detecção e retransmissão, pode ser mais eficiente que o ARQ sozinho. Esta estratégia, chamada de ARQ híbrido [2], pode realizar uma melhora significativa de desempenho em sistemas de comunicação móvel.

## II. TRABALHOS RELACIONADOS E CONTRIBUIÇÃO DESTES TRABALHOS

O desempenho do conjunto de protocolos TCP/RLP em ambientes de comunicações sem fio CDMA (*Code Division Multiple Access*) tem estimulado várias pesquisas [1] [3] [4] [5], de modo que os usuários possam utilizar as aplicações Internet em redes sem fio de forma confiável. Expressões matemáticas para probabilidade de erro média de bit, vazão de dados e atraso médio para o protocolo TCP sobre o sistema CDMA têm sido obtidas [6] [7] [8], fornecendo orientação para melhorar o desempenho do sistema. A substituição da estratégia ARQ pela estratégia ARQ Híbrido no protocolo RLP pode trazer uma melhora em termos de desempenho da pilha TCP/RLP. A proposta deste trabalho é avaliar, através de parâmetros de qualidade de serviço como vazão de dados e atraso médio, essa possível melhoria.

## III. ESTRATÉGIA ARQ HÍBRIDO

Em um projeto de sistema de transmissão digital a principal preocupação é o controle de erros, tal que uma reprodução confiável dos dados seja obtida. Uma das formas de realizar esse controle consiste no uso da estratégia FEC, na qual, códigos corretores de erros automaticamente corrigem erros

detectados no receptor. Outra forma baseia-se no uso da estratégia ARQ, neste esquema, quando erros são detectados no receptor, uma solicitação é enviada para o transmissor repetir os dados, isto acontece até que os dados sejam recebidos corretamente ou seja alcançado o número de retransmissões possíveis na estratégia.

A maior vantagem da estratégia ARQ sobre a FEC é que a detecção de erros requer um equipamento de decodificação mais simples. Técnicas ARQ também fornecem alta confiabilidade ao sistema, ao custo de um grande aumento em dispositivos de armazenamento (memórias). Assim, quando a taxa de erro do canal é alta, retransmissões ocorrem frequentemente, nesse caso a estratégia ARQ diminui o desempenho do sistema. Uma forma de tentar melhorar a eficiência do sistema seria realizar uma combinação apropriada das técnicas FEC e ARQ. Esta estratégia recebe a denominação de ARQ híbrido [2].

Um sistema ARQ Híbrido consiste de um FEC contido em um sistema ARQ. A função da parte FEC é reduzir a frequência de retransmissão corrigindo os padrões de erros que ocorrem mais frequentemente. Isto aumenta a vazão de dados do sistema. Quando um padrão de erros menos freqüente ocorre e é detectado, o receptor solicita uma retransmissão ao invés de passar uma mensagem não confiável para o usuário. Isto aumenta a confiabilidade do sistema. Como resultado, uma conveniente combinação de ARQ e FEC fornece uma maior confiabilidade que um esquema FEC sozinho e uma maior vazão de dados que um sistema com somente o esquema ARQ. Além disso, a implementação do codificador torna-se simples já que ele é projetado para corrigir uma pequena coleção de padrões de erros.

A estratégia ARQ Híbrido utiliza um código, o qual é projetado para correção e detecção de erro simultaneamente. Quando um pacote recebido é detectado em erro, o receptor tenta primeiro localizar e corrigir os erros. Se o número de erros (ou o tamanho de um surto de erros) está dentro da capacidade de correção de erro projetada do código, os erros serão corrigidos e os dados decodificados serão passados para o usuário. Se um padrão de erro não corrigível é detectado, o receptor rejeita o pacote recebido e solicita uma retransmissão. Quando um pacote retransmitido é recebido, o receptor tenta novamente corrigir os erros (se existirem). Se a decodificação não é bem sucedida, o receptor de novo rejeita o pacote recebido e solicita outra retransmissão. Este processo de correção de erro e retransmissão continua até alcançar o número de retransmissões permitidas. Como exemplo, um sistema ARQ Híbrido pode usar um código BCH (255,179). Este código tem distância mínima 21 e capacidade de erro igual a 10. Entretanto, ele pode ser usado para corrigir 5 ou menos erros e simultaneamente detectar qualquer combinação de 15 ou menos erros. Se um padrão de erro com 5 ou menos erros ocorre, ele será detectado e corrigido. Se um padrão de erro com mais de 5 e menos que 16 erros ocorre, ele será detectado. Neste caso, o receptor solicitará uma retransmissão do pacote errado. Um padrão de erro não detectável ocorrerá quando acontecerem 16 ou mais erros.

#### IV. MODELO DO SISTEMA

Um sistema CDMA com  $C$  células e  $N$  usuários distribuídos uniformemente em cada célula, canal seletivo em frequência com desvanecimento do tipo Rayleigh, modulação BPSK (*Binary Phase Shift Keying*), perda de percurso exponencial, sombreamento lognormal e erro no controle de potência são considerados. As células são circulares com uma estação base no centro. A interferência é calculada em uma estação móvel na célula central do *cluster*.

O canal seletivo em frequência produz  $L$  percursos, onde o perfil de intensidade multipercurso e todos os multipercursos são independentes e identicamente distribuídos. Na recepção, um receptor Rake combina convenientemente os multipercursos melhorando a eficiência do sistema. O desvanecimento e a fase de todos os percursos são assumidos constantes em um período de um bit. O ruído aditivo é Gaussiano com média zero e densidade espectral de potência bilateral  $\frac{N_0}{2}$ .

As medidas de desempenho, vazão e dados e atraso médio, são obtidas no enlace reverso de uma célula desse sistema CDMA multicelular. Nessa célula é suposto um provedor de serviço de Internet localizado na estação base. Além disso, cada usuário é considerado estar em alta mobilidade.

A unidade de transferência no protocolo TCP é chamada segmento TCP. Cada segmento TCP é dividido em duas partes: bits de cabeçalho seguidos de bits de informação. Visando a modelagem matemática do sistema, considera-se que o protocolo TCP use um código de bloco para detecção de erro. Dessa forma define-se a taxa de código desse protocolo como:

$$r_{cTCP} = \frac{I_{TCP}}{N_{TCP}} \quad (1)$$

onde:

$$N_{TCP} = I_{TCP} + H_{TCP}.$$

$I_{TCP}$ : número de bits de informação no segmento TCP.

$H_{TCP}$ : número de bits de cabeçalho no segmento TCP.

$N_{TCP}$ : número total de bits no segmento TCP.

Considera-se aqui que o código possui capacidade de detecção de erro ideal, ou seja,  $N_{TCP}$ .

O protocolo RLP utiliza o esquema ARQ Híbrido, o qual usa um código para correção e detecção de erro. Portanto, a taxa de código nesse protocolo fica definida assim:

$$r_{cRLP} = \frac{I_{RLP}}{N_{RLP}} \quad (2)$$

onde:

$$N_{RLP} = I_{RLP} + H_{RLP}$$

$I_{RLP}$ : número de bits de informação no pacote RLP

$H_{RLP}$ : número de bits de cabeçalho no pacote RLP

$N_{RLP}$ : número total de bits no pacote RLP

O código utilizado no ARQ Híbrido é um código de bloco (175,99). Este código foi obtido a partir do encurtamento [9] do código BCH (255,179) que possui capacidade de correção de erro 10 e distância mínima 21. Esta modificação manteve tanto a capacidade de correção quanto a distância mínima do código original. Além disso, adicionou-se alguns bits de cabeçalho no pacote RLP para serem usados pelo protocolo RLP. Outro objetivo dessa adição extra de bits de controle foi

manter o tamanho do pacote RLP especificado pela norma IS-99 [1]. O processo de decodificação utilizado é o de decisão abrupta devido ao comprimento longo do código. A parte ARQ é composta de um esquema de repetição seletiva baseado em NAK (*Negative Acknowledgment*), o que significa que a ocorrência de retransmissões está restrita ao envio de solicitação pelo receptor.

Considerando o cenário proposto acima, a probabilidade de erro de bit codificado condicionada ao desvanecimento e ao erro no controle de potência é dado por [6]:

$$P_{bc}(e | \lambda, \alpha) = Q(\sqrt{2\gamma_{bc}}) \quad (3)$$

onde:

$Q(\cdot)$  é a função de erro Gaussiana.

$\alpha = \sum_{i=1}^L \alpha_i^2$  representa uma variável aleatória chi-quadrada.  $\alpha_i$  é uma variável aleatória Rayleigh modelando o desvanecimento em cada multipercurso.

$\lambda$  é uma variável aleatória lognormal modelando o erro no controle de potência.

$\gamma_{bc}$  é a relação sinal-ruído-mais-interferência por bit codificado dada por:

$$\gamma_{bc} = \frac{\lambda^2 \alpha}{I} \quad (4)$$

onde:

$I$  representa a interferência média no usuário alvo:

$$I = \frac{L e^{2\sigma_\lambda}}{r_c} \left[ \frac{2}{3G_p} [(N-1) + m_I] + \left( \frac{E_b}{N_0} \right)^{-1} \right] \quad (5)$$

onde:

$\sigma_\lambda$  é o desvio padrão logarítmico de  $\lambda$ .

$r_c = r_{cTCP} r_{cRLP}$  é a taxa de codificação.

$G_p$  é o ganho de processamento.

$m_I$  é a média da interferência externa. Interferência externa é a interferência considerada na estação base da célula central devido as estações móveis que não estão sendo controladas por esta estação base.

$\frac{E_b}{N_0}$  é a relação sinal-ruído por bit.

O descondicionamento da eq. (3) pela variável aleatória chi-quadrada é conhecida da literatura [10]:

$$P_{bc}(e | \lambda) = \left( \frac{1-\nu}{2} \right)^L \sum_{m=0}^{L-1} \binom{L-1+m}{m} \left( \frac{1+\nu}{2} \right)^m \quad (6)$$

onde:

$$\nu = \sqrt{\frac{E\alpha\{\gamma_{bc}\}}{E\alpha\{\gamma_{bc}\} + L}} \quad (7)$$

e

$$E\alpha\{\gamma_{bc}\} = \frac{\lambda^2}{\frac{e^{2\sigma_\lambda}}{r_c} \left[ \frac{2}{3} \left[ \frac{N-1}{G_p} + \frac{m_I}{G_p} \right] + \left( \frac{E_b}{N_0} \right)^{-1} \right]} \quad (8)$$

O próximo passo é o descondicionamento pelo erro no controle de potência [6]:

$$P_{bc} = E_\lambda[P_{bc}(e | \lambda)] = \int_0^\infty P_{bc}(e | \lambda) p_\lambda d\lambda \quad (9)$$

No entanto, esta equação não possui forma fechada, mas pode ser resolvida numericamente.

## V. MEDIDAS DE DESEMPENHO PARA PROTOCOLO TCP

O protocolo RLP foi proposto com o objetivo de reduzir a taxa de perdas de segmentos TCP em ambientes sem fio. Para isto, ele divide os segmentos TCP em segmentos menores, chamados pacotes RLP, e transmiti-os no canal sem fio. O padrão TIA/EIA/IS-99 apresenta outros protocolos (ICMP, IP, SNDXCF, IPCP, LCP e PPP) entre os protocolos TCP e RLP, entretanto esses protocolos geram uma quantia fixa de cabeçalhos. Dessa forma, são os mecanismos ARQ implementados nas camadas TCP e RLP que contribuem para a maior flutuação e possível degradação de desempenho do sistema [11]. A vantagem da utilização da estratégia ARQ Híbrido no protocolo RLP é que a sua implementação está restrita à camada de enlace entre a estação móvel e a estação base, não existindo necessidade de mudanças na estrutura de camadas TCP/IP.

O modelo de comunicação adotado neste trabalho é mostrado na fig. 1. Neste modelo, considera-se a troca de dados entre uma estação móvel e uma estação base, onde existe um servidor na Internet. A camada física é especificada pelo padrão CDMA IS-95.

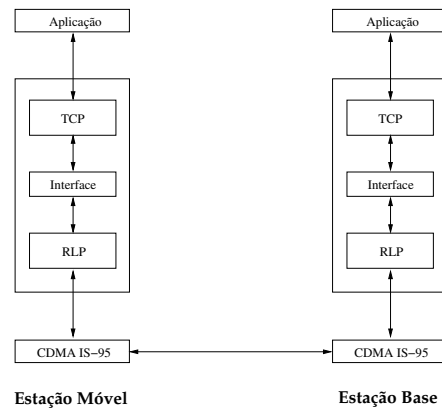


Fig. 1. Modelo de comunicação CDMA simplificado utilizando o padrão IS-99

### A. Atraso Médio de segmentos TCP

Para um usuário em alta mobilidade, o desvanecimento tende a ser descorrelacionado entre os bits. Como considera-se decisão abrupta [10] no decodificador, define-se a probabilidade de não ocorrer erro ou ocorrer um padrão de erro corrigível no pacote RLP por:

$$P_{aRLP} = \sum_{i=0}^{t_p} \binom{N_{RLP}}{i} P_{bc}^i (1 - P_{bc})^{N_{RLP}-i} \quad (10)$$

onde  $t_p$  é a capacidade de correção de erro projetada do código,  $N_{RLP}$  é o número de bits em um pacote RLP e  $P_{bc}$

representa a probabilidade de erro de bit codificado, dada por (9).

A probabilidade de ocorrer um padrão de erro detectável no pacote RLP é dada por:

$$P_{rRLP} = \sum_{m=d_{pi}}^{d_{ps}} \binom{N_{RLP}}{m} P_{bc}^m (1 - P_{bc})^{N_{RLP}-m} \quad (11)$$

onde  $d_{pi}$  e  $d_{ps}$  são os limites inferior e superior, respectivamente, do intervalo onde ocorre detecção de erros, ou seja, é o intervalo de retransmissão.

Conseqüentemente, a probabilidade de ocorrer um padrão de erro não detectável no pacote RLP é dada por:

$$P_{eRLP} = \sum_{n=d_{ps}+1}^{N_{RLP}} \binom{N_{RLP}}{n} P_{bc}^n (1 - P_{bc})^{N_{RLP}-n} \quad (12)$$

A ocorrência de perda do segmento TCP vai depender do tipo de erro ocorrido no pacote RLP. Assim, pode-se dividir a probabilidade de ocorrer erro em um segmento TCP em duas situações. A primeira situação acontece quando ocorre um padrão de erro não detectável em no mínimo um pacote RLP, não havendo assim retransmissões na camada RLP. Dessa forma, pode-se definir a probabilidade de ocorrer erro no segmento TCP por:

$$P_{eTCP} = \sum_{j_0=1}^{n_{RLP}} \binom{n_{RLP}}{j_0} P_{eRLP}^{j_0} (1 - P_{eRLP})^{n_{RLP}-j_0} \quad (13)$$

onde  $n_{RLP}$  é o número de pacotes RLP necessários para fragmentar um segmento TCP e  $P_{eRLP}$  representa a probabilidade de ocorrer um erro não detectável no pacote RLP, dada por (12).

Na outra situação, ocorre um padrão de erro detectável em pelo menos um pacote RLP. Dessa forma, poderá existir um máximo de  $r$  retransmissões na camada RLP com o objetivo de entregar o segmento TCP livre de erros para a camada TCP. Usando o resultado apresentado por [7], pode-se definir a probabilidade de ocorrer erro no segmento TCP por:

$$\begin{aligned} P_{rTCP} &= \sum_{j_0=1}^{n_{RLP}} \binom{n_{RLP}}{j_0} P_{rRLP}^{j_0} (1 - P_{rRLP})^{n_{RLP}-j_0} \\ &\times \sum_{j_1=1}^{j_0} \binom{j_0}{j_1} P_{rRLP}^{j_1} (1 - P_{rRLP})^{j_0-j_1} \\ &\dots \sum_{j_r=1}^{j_{r-1}} \binom{j_{r-1}}{j_r} P_{rRLP}^{j_r} (1 - P_{rRLP})^{j_{r-1}-j_r} \quad (14) \end{aligned}$$

onde:

$j_0$  representa o número de pacotes RLP errados na transmissão;

$j_{r-1}$  representa o número de pacotes RLP errados na retransmissão  $r - 1$ ;

$P_{rRLP}$  representa a probabilidade de ocorrer um padrão de erro detectável no pacote RLP, dada por (11);

e

$j_{-1} = n_{RLP}$  para nenhuma retransmissão.

Finalmente, a probabilidade total de um segmento TCP estar errado é definida como:

$$P_{tTCP} = P_{eTCP} + P_{rTCP} - P_{eTCP}P_{rTCP} \quad (15)$$

O tempo médio necessário para transmitir um segmento TCP, sem considerar se esse segmento foi remontado com sucesso, é dado por [8]:

$$T_{TCP} = \frac{1 - (P_{rRLP})^{r+1}}{1 - P_{rRLP}} \tau_{TCP,min} \quad (16)$$

onde  $\tau_{TCP,min}$  é o tempo mínimo necessário para um segmento TCP ser transmitido, que é dado por:

$$\tau_{TCP,min} = n_{RLP} T_{RLP} + \tau_p \quad (17)$$

onde  $\tau_p$  é o tempo de propagação.

Supondo que o protocolo TCP realize sucessivas retransmissões de seus segmentos recebidos com erro até obter sucesso, o atraso de segmentos TCP é modelado por uma variável aleatória geométrica [7]. Assim, o atraso médio de segmentos TCP é dado por:

$$\overline{\tau_{TCP}} = \frac{T_{TCP}}{1 - P_{tTCP}} \quad (18)$$

onde  $P_{tTCP}$  é a probabilidade total de erro do segmento TCP, dada por (15) e  $T_{TCP}$  é o tempo usado para transmitir um segmento TCP entre as camadas RLP transmissora e receptora, dado por (16).

Substituindo (16) em (18) e normalizando pelo tempo mínimo  $\tau_{TCP,min}$ , obtém-se o atraso médio de segmentos TCP normalizado pelo tempo mínimo [8]:

$$\overline{\tau_{TCP,N}} = \frac{1 - (P_{rRLP})^{r+1}}{(1 - P_{rRLP})(1 - P_{tTCP})} \quad (19)$$

## B. Vazão de Dados de segmentos TCP

Define-se vazão de dados neste trabalho como a taxa de transmissão de bits TCP recebidos sem erro após a camada RLP. Segundo [8] existe uma relação inversamente proporcional entre vazão de dados normalizada pela taxa de informação  $R_b$  e o atraso médio normalizado pelo tempo mínimo  $\tau_{TCP,min}$ , portanto:

$$\eta_{TCP,N} = \frac{1}{\overline{\tau_{TCP,N}}} \quad (20)$$

## VI. MODELO DE SIMULAÇÃO

O objetivo do trabalho é a avaliação de desempenho dos protocolos TCP/RLP ao se utilizar a estratégia ARQ Híbrido no protocolo RLP. Portanto, realizou-se uma simulação semi-analítica, em que modelou-se o evento "erro de bit" nos pacotes RLP num sistema BPSK com relação sinal-ruído correspondente à do sistema CDMA, onde leva-se em conta: somreamento, perda de percurso, número de usuários interferentes e ruído AWGN (*Additive White Gaussian Noise*).

Os bits de informação do segmento TCP são gerados aleatoriamente. Os segmentos TCP são então divididos em pacotes RLP, codificados usando um código BCH encurtado e modulados usando BPSK. Os bits modulados são então

transmitidos por  $L$  percursos. Desvanecimento não correlacionado e erro no controle de potência são caracterizados em cada percurso por variáveis aleatórias do tipo Rayleigh e lognormal, respectivamente. Na recepção é usado um receptor Rake, supondo estimação perfeita do desvanecimento. Então são realizadas a demodulação e a decodificação usando decisão abrupta.

A tabela I mostra os valores utilizados na obtenção dos resultados teóricos e simulados. O valor médio da interferência normalizado pelo número de usuários é dado em função do desvio padrão do sombreamento lognormal e do expoente perda de percurso, considerando monitoração do sinal dos usuários por 3 estações base [12].

Vazão de dados e atraso médio dos segmentos TCP estão normalizados pela taxa de informação e pelo tempo mínimo, respectivamente. Ambas as medidas de desempenho foram traçadas em função da carga do sistema, que é dada por:

$$\varphi = \frac{N-1}{G_p} \quad (21)$$

TABELA I  
VALOR DOS PARÂMETROS USADOS

Parâmetro	Valor
$L$	3
$\frac{E_b}{N_0}$	20 dB
$G_p$	128
$\sigma_s$	8 dB
$\gamma$	4
$\frac{m_l}{N}$	0.89
$\sigma_\lambda$	1 dB
$I_{TCP}$	4.288 bits
$H_{TCP}$	24 bits
$N_{TCP}$	4.312 bits
$I_{RLP}$	99 bits
$H_{RLP}$	93 bits
$N_{RLP}$	192 bits
$n_{RLP}$	44 pacotes
$R_b$	9600 bits/s

## VII. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As figuras 2 e 3 mostram a vazão de dados e o atraso médio normalizados para o protocolo TCP, respectivamente, em função da carga do sistema. Considera-se até 3 repetições na camada RLP. A capacidade de correção do código ( $t_p$ ) bem como a capacidade de detecção ou intervalo de retransmissão ( $d_p$ ) são variados. Pode-se ver que o esquema ARQ Híbrido utilizando um código com capacidade de correção até 8 bits e capacidade de detecção de 9 à 12 bits em cada pacote RLP obtém o melhor resultado entre os esquemas projetados. O esquema que utiliza a capacidade de correção total do código, ou seja 10, não efetuando assim retransmissões, apresenta desempenho inferior aos esquemas, que mesclam capacidade de correção e retransmissão, mostrados nas figuras.

Vazão de dados e o atraso médio normalizados para o protocolo TCP, em função da carga do sistema, são mostrados nas figuras 4 e 5, respectivamente. Considera-se que o código implementado na parte FEC do esquema ARQ Híbrido possua capacidade de correção até 8 bits e capacidade de

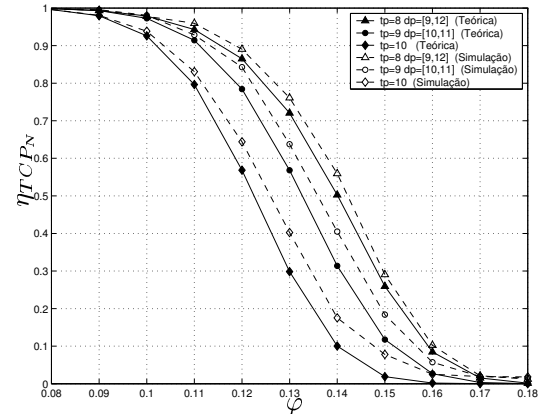


Fig. 2. Vazão de dados normalizada do protocolo TCP, em função da carga do sistema, parametrizada pela capacidade de correção do código e intervalo de retransmissão.

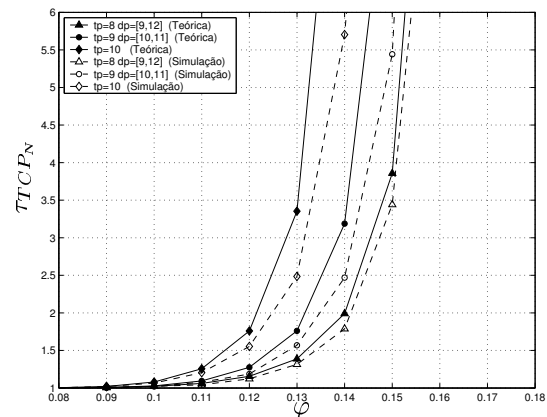


Fig. 3. Atraso médio normalizado do protocolo TCP, em função da carga do sistema, parametrizado pela capacidade de correção do código e intervalo de retransmissão.

detecção de erro de 9 à 12 bits em cada pacote RLP. O número de retransmissões é variado na camada RLP. Observa-se uma melhora de desempenho com o aumento do número de retransmissões permitidas. O número de 3 retransmissões obtém o melhor resultado entre os valores adotados. A partir de 3 retransmissões não existe um ganho significativo no desempenho do sistema.

As figuras 6 e 7 comparam as estratégias de controle de erro para vazão de dados e o atraso médio normalizados para o protocolo TCP, respectivamente, em função da carga do sistema. Considera-se que o código implementado na parte FEC do esquema ARQ Híbrido possua capacidade de correção até 8 bits e intervalo de retransmissão de 9 à 12 bits em cada pacote RLP. O número de retransmissões é fixado no máximo em 3 na camada RLP. Pode-se ver que o esquema ARQ Híbrido fornece um ganho significativo no desempenho do sistema.

## VIII. CONCLUSÕES

A implementação da técnica ARQ Híbrido no protocolo RLP correspondeu às expectativas quanto à melhora nas medidas de desempenho, vazão de dados e atraso médio, em

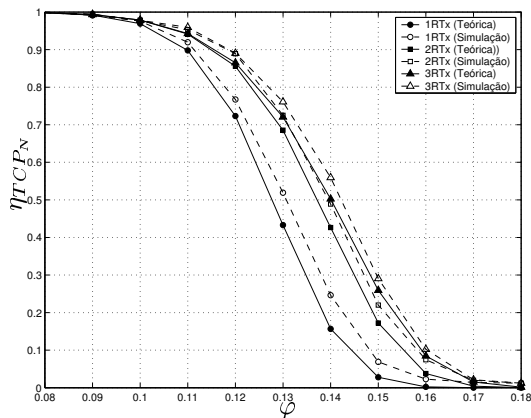


Fig. 4. Vazão de dados normalizada do protocolo TCP, em função da carga do sistema, parametrizada pelo número de retransmissões no protocolo RLP.

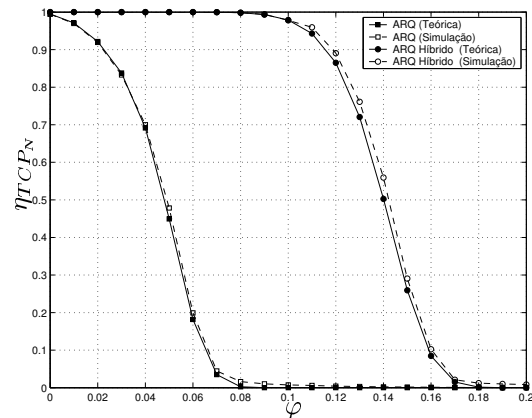


Fig. 6. Vazão de dados normalizada do protocolo TCP, em função da carga do sistema, parametrizada pelo tipo de estratégia de controle de erro.

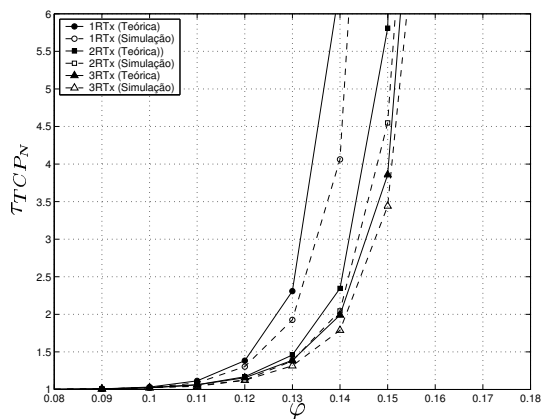


Fig. 5. Atraso médio normalizado do protocolo TCP, em função da carga do sistema, parametrizado pelo número de retransmissões no protocolo RLP.

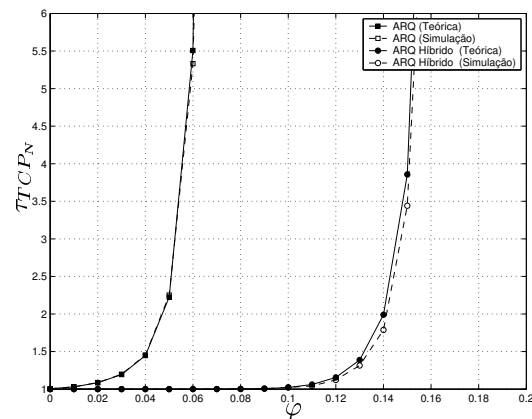


Fig. 7. Atraso médio normalizado do protocolo TCP, em função da carga do sistema, parametrizada pelo tipo de estratégia de controle de erro.

um ambiente de interação entre o protocolo TCP e redes sem fio CDMA. Isto aconteceu porque a estratégia ARQ necessita fazer muitas retransmissões em canais com altas taxas de erro, que é o caso de um canal sem fio. A parte FEC da estratégia ARQ Híbrido corrigiu os padrões de erros que ocorrem mais freqüentemente, eliminando um grande número de retransmissões RLP. Isto aumentou a vazão de dados e diminuiu o atraso médio do sistema. O esquema ARQ Híbrido utilizando código com capacidade de correção de erro até 8 bits e intervalo de retransmissão de 9 à 12 bits, usando até 3 retransmissões na camada RLP, mostrou-se o melhor entre todos.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao grupo de pesquisa do laboratório, principalmente Gonzalo F. Cifuentes e Rodrigo P. Ramos, e a todos aqueles que colaboraram de alguma forma para a realização desse trabalho.

REFERÊNCIAS

[1] A. Chockalingam and G. Bao, "Performance of TCP/RLP Protocol Stack on Correlated Fading DS-CDMA Wireless Links", IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 49, No. 1 pp.28-33, January 2000.

[2] Shu Lin, Daniel J. Costello, Jr., "Error Control Coding: Fundamentals and Applications", Prentice-Hall, 1983.  
 [3] F. Khan, S. Kumar, K. Medepalli and S. Nanda, "TCP Performance over CDMA2000 RLP", in Vehicular Technology Conference Proceedings, IEEE VTC 2000-Spring Tokyo, Vol.1, pp.41-45, May 2000.  
 [4] Y. Bai, P. Zhu, A. Rudrapatna and Andy T. Ogielski, "Performance of TCP/IP over IS-2000 Based CDMA Radio Links", in Vehicular Technology Conference Proceedings, IEEE VTS-Fall VTC 2000, Vol.3, pp.1036-1040, September 2000.  
 [5] Z. Kostic, X. Qiu and Li F. Chang, "Interactions Between TCP and RLP Protocols in a Cellular System", in Vehicular Technology Conference Proceedings, IEEE VTC 2001-Spring, Vol.3, pp.2244-2248, May 2001.  
 [6] Érico P. da Silva, "Cálculo da Probabilidade de Erro Média de Bit de Sistemas CDMA em Canais Seletivos em Frequência", Tese de Mestrado, UNICAMP, 2000.  
 [7] Teógenes B. da Nóbrega, "Eficiência dos Protocolos TCP/RLP sobre Sistemas sem fio WCDMA usando Arranjos Lineares de Antenas", Tese de Mestrado, UNICAMP, 2002.  
 [8] Gonzalo Fernando O. Cifuentes, "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.  
 [9] J. Bibb Cain, George C. Clark, Jr., "Error-Correction Coding for Digital Communications", Plenum Press, 1981.  
 [10] John G. Proakis, "Digital Communications", McGraww-Hill, Third Edition, 1995.  
 [11] Gang Bao, "Performance Evaluation of TCP/RLP Protocol Stack over CDMA Wireless Link", in Communication Technology Proceedings, ICCT'96, Vol.2, pp.710-713, May 1996.  
 [12] C. de Almeida and R. Hoefel, "On the Interference of Cellular CDMA Systems", in International Telecommunications Symposium Proceedings, ITS'98, Vol.1, pp.166-171, Brazil, August 1998.