

Esquema de Controle de Erro em ADSL Utilizando ARQ Híbrido

Fabiano Bizinelli e Walter Godoy Junior

Resumo—A principal contribuição deste artigo é um novo esquema de controle de erro em ADSL do tipo ARQ híbrido que melhora o desempenho de aplicações TCP, evitando o acionamento dos algoritmos de prevenção de congestionamento. São apresentados resultados de simulações que comprovam a eficiência deste esquema.

Palavras-Chave—Controle de Erro, ARQ Híbrido, Decodificação Reed-Solomon, ADSL.

Abstract—The main contribution of this work is a novel error control scheme for ADSL based on hybrid ARQ. This scheme improves performance of TCP applications, thus avoiding the execution of congestion avoidance algorithms. We present outcomes from simulations that prove the efficiency of the scheme.

Index Terms—Error Control, Hybrid ARQ, Reed-Solomon Decoding, ADSL.

I. INTRODUÇÃO

A tecnologia de Linha de Assinante Digital Assimétrica (ADSL) pertence a um conjunto de tecnologias cuja finalidade é propiciar transmissão digital de dados em meios metálicos de transmissão, tal como o par trançado de fios de cobre utilizado no sistema telefônico. Essas tecnologias permitem velocidade de comunicação de dados muito maior que a dos modems tradicionais que operam na banda de transmissão de voz do serviço de telefonia comum (POTS).

O modo de transferência assíncrono (ATM) é a forma mais utilizada para o transporte de dados em redes de acesso constituídas pela tecnologia ADSL, pois apresenta escalabilidade, possibilita a integração de serviços ao usuário e de gerenciamento e garante qualidade de serviço (QoS). Este padrão de rede consiste de comutadores (*switches*) de alta velocidade que interligam computadores e outros *switches*, fibras óticas para conexão e quadros pequenos e de tamanho fixo denominados células.

Dada sua característica assimétrica, oriunda da velocidade de comunicação maior no sentido *downstream* (da rede para o usuário) que no sentido *upstream* (do usuário para a rede), a

implantação do ADSL ganhou impulso com a popularização dos serviços de Internet. A Internet baseia-se em um conjunto de protocolos estabelecidos pela arquitetura TCP/IP, nome que advém de seus dois protocolos mais importantes, o protocolo entre redes (IP) e o protocolo de controle de transmissão (TCP).

O TCP, protocolo da camada de transporte do padrão TCP/IP, tem por finalidade o fornecimento de comunicação altamente confiável entre máquinas em redes de comunicação de computadores comutadas por pacotes e em sistemas interconectados de tais redes. Este protocolo é orientado à conexão, de modo que, antes de transmitir dados, os participantes têm de estabelecer um canal de comunicação. Todos os dados viajam em segmentos TCP, que por sua vez viajam pela Internet em datagramas IP.

Muitas características do ATM e do ADSL prejudicam a comunicação de dados por meio dos protocolos TCP/IP. Vários trabalhos estudaram a influência dos tipos de ruído presentes em linhas com ADSL no desempenho de vazão do ATM e do TCP [1], [2], [3], [4], [5], [6], [7]. Outros trabalhos relacionaram a assimetria de tráfego como fator degradante do desempenho do protocolo TCP [4], [8], [9], [10], devido à baixa velocidade no sentido reverso, de onde vêm as confirmações de recebimento. Há ainda trabalhos que analisaram a influência da segmentação dos segmentos TCP (grandes e de tamanho variável) em células ATM (pequenas e de tamanho fixo) [4], [10], [11].

Este trabalho apresenta uma contribuição sobre o controle de erros de quadros ADSL e sua influência na comunicação de dados pelo TCP, propondo o uso de um mecanismo de retransmissão de quadros com erros que não possam ser corrigidos pelos mecanismos já estabelecidos de correção de erro do ADSL. Este mecanismo é conhecido como a versão híbrida do pedido de repetição automática (ARQ híbrido ou HARQ). A organização deste artigo foi idealizada nos seguintes moldes. Na Seção II, descrevem-se as características da tecnologia ADSL conforme os padrões estabelecidos. Na Seção III, é descrito o funcionamento do esquema de controle de erro em ADSL baseado em HARQ. Os resultados das simulações são mostrados na Seção IV. Finalmente, na Seção V encontram-se as conclusões principais relativas a este trabalho.

II. A TECNOLOGIA ADSL

A tecnologia ADSL permite a comunicação de dados em

Fabiano Bizinelli e Walter Godoy Junior, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná, Curitiba, Brasil. E-mails: fabiano@citec.cefetpr.br, godoy@cefetpr.br. Este trabalho foi parcialmente financiado pelo CNPq.

alta velocidade no laço local de cobre simultaneamente com o serviço de telefonia (POTS), pois são utilizadas duas bandas de frequência acima da banda de comunicação de voz. Cada banda de frequência engloba os sinais de transmissão em um dos sentidos. A característica assimétrica do ADSL procede da maior largura da banda de transmissão de dados no sentido *downstream* em relação à largura da banda de transmissão no sentido *upstream*.

A modulação padronizada para o ADSL, conhecida como múltiplos tons discretos (DMT), é uma técnica de modulação multiportadora onde a banda-base de 1,104 MHz é dividida em subcanais ou tons de 4,3125 kHz de largura. Essa divisão simplifica a implementação dos filtros de recepção, uma vez que a relação sinal-ruído em cada subcanal não varia tanto quanto em um canal mais largo [12]. Em cada subcanal há um modulador QAM independente, onde o tamanho máximo da constelação é determinado pela relação sinal-ruído presente apenas no subcanal. Desta forma, a taxa de transmissão de dados em ADSL adapta-se às condições da linha.

Com o intuito de melhorar o desempenho de transmissão em linhas ruidosas, os dados são codificados por um código corretor de erro (FEC) antes de serem transmitidos. O código utilizado é um Reed-Solomon sobre GF(256). Além do FEC, existem dois mecanismos adicionais que aumentam a confiabilidade dos dados: intercalamento e modulação codificada em treliças.

III. O ADSL COM ARQ HÍBRIDO

A. Motivação

Diversos trabalhos, tais como [1], [2], [3], [4], [5], [6] e [7], analisaram a influência de erros em uma linha ADSL na comunicação TCP. Estes erros podem não ser corrigidos pelo FEC do ADSL, devido à baixa confiabilidade deste esquema de controle de erro [13], ocasionando o descarte de pacotes das camadas superiores, no caso, células ATM e pacotes TCP. Estes descartes podem ser interpretados pelo TCP como congestionamento, iniciando os procedimentos de prevenção de congestionamento (*congestion avoidance*). Estes diminuem a vazão da fonte pela redução da janela de transmissão, oferecendo condições para que os roteadores esvaziem os *buffers* e reduzam a carga da rede para sair do estado de congestionamento. Portanto, erros no enlace ADSL diminuem a vazão de dados das aplicações que utilizam o protocolo TCP.

Partindo dessa verificação, idealizou-se um esquema de controle de erro com ARQ híbrido do tipo I para sistemas ADSL. O ARQ híbrido reduz a quantidade de pacotes passados ao usuário que apresentam erro, conseqüentemente diminuindo as intervenções dos algoritmos de prevenção de congestionamento do TCP.

B. O ARQ Híbrido

O ARQ híbrido (HARQ) é um esquema de controle de erro

que incorpora a correção de erro do FEC e a retransmissão do ARQ com o objetivo de eliminar as desvantagens individuais destes dois meios de controle de erro [13]. No caso do ARQ puro, a vazão na saída do decodificador não é constante e cai rapidamente com o aumento da taxa de erro do canal. Em se tratando do FEC, a confiabilidade do sistema é baixa e seu aumento requer códigos mais longos, dificultando a implementação e aumentando os custos.

No HARQ, a função da correção de erro é diminuir a frequência de retransmissões, corrigindo os padrões de erro que ocorrem com mais frequência. Isso aumenta o desempenho do sistema no tocante à vazão. Entretanto, quando um padrão de erro menos freqüente ocorre e é detectado, o receptor solicita retransmissão ao invés de passar a mensagem decodificada possivelmente com erro ao usuário, aumentando a confiabilidade do sistema. Com isso, uma combinação apropriada de FEC e ARQ fornece confiabilidade maior que um sistema FEC isolado e vazão maior que um sistema com ARQ.

Existem dois tipos de esquema HARQ. O tipo I baseia-se em um código que simultaneamente corrige e detecta erros. O tipo II funciona como um esquema adaptativo, operando como um ARQ puro com poucos bits de paridade quando o canal não apresenta erros, mas aumentando a quantidade de bits de paridade nas retransmissões para tentar corrigir a mensagem quando a quantidade de erros aumenta.

C. Descrição do Protocolo de Retransmissão

Considera-se um sistema ADSL formado por um par trançado e duas Unidades Transceptoras ADSL (ATUs) localizadas nos pontos A e B. Não importa o sentido do tráfego em questão, se *downstream* ou *upstream*, uma vez que o esquema de retransmissão funciona nos dois sentidos. Quadros ADSL com padrão de erro corrigível são passados normalmente às camadas superiores. Se a ATU do lado B detectar um padrão de erro não corrigível em um quadro ADSL, ela passa a incluir um pedido de retransmissão deste quadro em todos os quadros ADSL no sentido reverso (isto é, nos quadros que trafegam de B para A), caracterizando a técnica conhecida como confirmação de carona (*piggybacking*), até que a retransmissão seja recebida. O protocolo utiliza apenas confirmações negativas (NAKs) para solicitar retransmissão.

Enquanto aguarda a retransmissão do quadro, a ATU no lado B bloqueia a recepção de novos quadros, armazenando todos os quadros ADSL recebidos após o quadro em que se detectou erro. Não pode haver inversão de ordem de quadros, uma vez que estes transportam células ATM, que devem ser entregues em ordem. Além disso, o descarte de um quadro de dados ADSL prejudica o funcionamento do algoritmo de delineamento de células.

Ao receber um quadro com pedido de retransmissão, o modem do lado A insere o conteúdo do quadro solicitado em um novo quadro e indica a retransmissão por meio de um bit de retransmissão. Isso evita sobrecarga (*overhead*) maior no

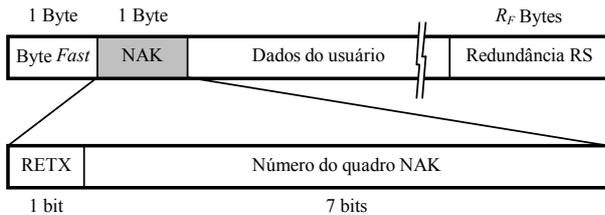


Fig. 1. Quadro de dados ADSL com byte de controle NAK.

quadro ADSL. De fato, apenas o conteúdo do quadro solicitado é retransmitido. É necessário, conseqüentemente, guardar uma cópia de cada quadro ADSL transmitido, até o limite da janela de transmissão.

Quando a ATU no lado B recebe um quadro ADSL com o bit de retransmissão ativo, desde que se encontre bloqueada, ela assume que os dados deste novo quadro pertencem ao quadro aguardado e os passa adiante. Os quadros armazenados são, então, decodificados e tratados pelo protocolo de retransmissão. Se todos os quadros armazenados puderem ser decodificados, seus dados também são passados adiante e o receptor é desbloqueado. Havendo um quadro armazenado com erro detectável, o receptor mantém o bloqueio, mas passa a solicitar retransmissão deste quadro.

O quadro é identificado por sua posição na estrutura de superquadro ADSL. Como visto anteriormente, o superquadro ADSL contém 68 quadros de dados, numerados de 0 a 67. Assim o número de seqüência não precisa ser transportado em um campo extra, pois ele está implícito no fluxo de quadros ADSL. A faixa de valores do número de seqüência impõe limite máximo no tamanho da janela de transmissão, além de limitar o tamanho dos *buffers* do transmissor e do receptor [13].

Uma inovação do esquema de controle de erro proposto é o parâmetro do protocolo denominado intervalo de retransmissão de quadros. Percebe-se que não há necessidade de se retransmitir o quadro solicitado para todos os NAKs recebidos, porque, se o primeiro quadro no sentido reverso contendo NAK não for danificado, este já é suficiente para solicitar a retransmissão. Em compensação, se apenas um quadro contendo NAK for transmitido e este sofrer danos, não haveria como o transmissor executar a retransmissão. Assim, o receptor envia continuamente NAKs para o transmissor até receber uma retransmissão válida. Entretanto o transmissor não responde a todos os NAKs recebidos – a primeira retransmissão ocorre para o primeiro NAK; mas as retransmissões seguintes ocorrem a cada n NAKs idênticos recebidos. O valor de n é denominado intervalo de retransmissão de quadro ou IRQ [14], [15], [16].

Um caso especial de funcionamento do protocolo ocorre quando se detecta erro em um quadro que contém retransmissão. O receptor, desconhecendo este detalhe, solicita a retransmissão. Mas o transmissor reconhece a situação e não envia a retransmissão, sinalizando ao receptor para ignorar o quadro e desbloquear a recepção.

Para a implementação do esquema proposto, necessita-se de um byte extra em todos os quadros de dados. Este byte,

ilustrado na Figura 1, possui um bit para indicar se os dados transportados são dados novos ou retransmissão de dados antigos, e 7 bits para indicar à outra ponta o número do quadro não-confirmado. A codificação do campo do número de quadro NAK permite representar todos os 68 quadros de dados, além de dois sinais: NO_RETX, sinal que indica ao receptor a presença de dados retransmitidos, e NO_DATA, que indica ao receptor que o conteúdo do quadro atual deve ser descartado.

D. O Decodificador

O esquema ARQ híbrido tipo I necessita de códigos com capacidade de detecção e correção de erros [13], [17]. Este tipo pode ser implementado usando um ou dois códigos. No caso de um único código, sistemas eficazes são obtidos com o uso de códigos Reed-Solomon [17].

Como a intenção do esquema proposto era de manter o codificador Reed-Solomon do ADSL, utilizou-se um decodificador Reed-Solomon com correção de erro e limitante de distância. O princípio de funcionamento deste decodificador é o seguinte: seja um decodificador com capacidade de correção de até k erros e \mathbf{r} uma palavra recebida. O decodificador seleciona a palavra-código \mathbf{c} que minimiza $d(\mathbf{r}, \mathbf{c})$ se e somente se existir \mathbf{c} tal que $d(\mathbf{r}, \mathbf{c}) \leq k$; se tal \mathbf{c} não existir, então é declarada falha de decodificação [17]. Esta falha de decodificação representa um erro detectável, que pode ser resolvido por meio de retransmissão. É possível que a palavra recebida possua padrão de erro não-detectável, de modo que o decodificador seleciona uma palavra-código diferente da que foi realmente transmitida (sendo \mathbf{t} a palavra-código transmitida, seleciona-se \mathbf{c} tal que $\mathbf{c} \neq \mathbf{t}$). Diz-se, então, que o decodificador cometeu um erro de decodificação. Estes conceitos estão ilustrados na Figura 2.

A simulação deste tipo de decodificador foi realizada mediante as probabilidades de erro e de falha de decodificação de uma palavra. Estas probabilidades são obtidas pela quantidade total de vetores e pela quantidade de vetores decodificáveis [18].

IV. SIMULAÇÃO E RESULTADOS

A. Simulação

A topologia de rede utilizada para as simulações realizadas

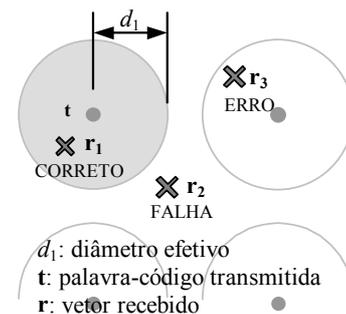


Fig. 2. Decodificador com Limitante de Distância.

é apresentada na Figura 3. Um usuário de serviço ADSL conecta-se a um servidor por meio do enlace ADSL e de um enlace sem perdas de 155 Mb/s. O atraso de propagação no enlace sem perdas foi estabelecido em 200 ms, representando a existência de outros enlaces e roteadores entre a central ADSL e o servidor. O atraso de propagação do enlace ADSL foi definido em 20 ms, o que equivale a uma linha de comprimento aproximado de 4,2 quilômetros [16].

O modelo de tráfego escolhido para avaliar o desempenho do sistema proposto foi transferência contínua de dados, tal como ocorre com a transferência de arquivos por meio do protocolo FTP. Após o estabelecimento da conexão, pacotes contendo 1.000 octetos de dados (mais 40 octetos relativos aos cabeçalhos TCP e IP) são enviados desde o servidor até o usuário. A duração total de cada simulação foi definida em 100 segundos, pois se verificou empiricamente que este tempo seria adequado para transmissão de quantidade de dados suficiente para análise.

Outras considerações estabelecidas para as simulações incluem a ausência do quadro de sincronismo e a implementação apenas do buffer de dados *fast* (sem intercalamento). A métrica utilizada foi a vazão relativa do TCP, que é a relação entre a vazão do sistema com ruído e a vazão do sistema sem perdas.

Os três pares de taxas de transmissão de dados em *downstream* e em *upstream* utilizados são apresentados na Tabela 1. Para cada par e cada valor da TEB, geraram-se três valores a partir de três simulações distintas, de onde se obteve a mediana para gerar cada ponto dos gráficos subsequentes. Verificou-se também o funcionamento do esquema proposto conforme a implementação TCP utilizada (*Reno*, *Tahoe* e *Vegas*).

B. Resultados

A Figura 4 ilustra o resultado obtido para o desempenho de vazão relativa do sistema ADSL padrão e dos sistemas ADSL com ARQ cujos intervalos de retransmissão variam de 1 a 6, para velocidade de transmissão de 6144 kb/s em *downstream* e 640 kb/s em *upstream*. A primeira observação deste gráfico indica que há um valor da taxa de erro de bit (neste caso igual a $2,5 \times 10^{-6}$) a partir do qual o desempenho de vazão começa a degradar. Esta característica já foi identificada em [4], [5], [6] e [7]. A vazão dos sistemas ADSL com ARQ é superior à vazão do sistema ADSL padrão no intervalo de $6,3 \times 10^{-6}$ a $2,5 \times 10^{-4}$, chegando a ser cerca de 10% maior nos pontos com maior inclinação. Deste ponto em diante, o desempenho

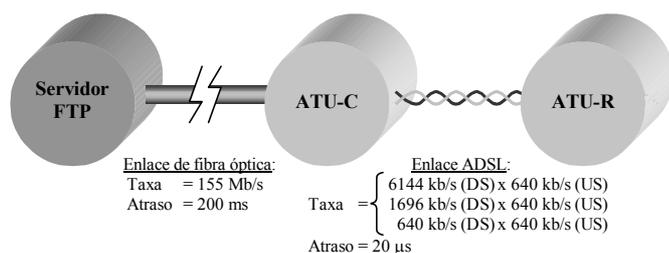


Fig. 3. Topologia utilizada nas simulações.

TABELA 1
PARES SIMULADOS DE TAXAS DE TRANSMISSÃO.

| | Taxa em <i>downstream</i> | Taxa em <i>upstream</i> |
|---|---------------------------|-------------------------|
| 1 | 6144 kb/s | 640 kb/s |
| 2 | 1696 kb/s | 640 kb/s |
| 3 | 640 kb/s | 640 kb/s |

de vazão relativa dos sistemas com ARQ e do padrão volta a ser semelhante. No concernente ao desempenho de vazão de sistemas ADSL com ARQ conforme o intervalo de retransmissão, a partir da taxa de erro de bit (TEB) de $1,0 \times 10^{-5}$ surgem pequenas diferenças na vazão relativa. Porém não existe intervalo de retransmissão predominante, que possua desempenho de vazão relativa superior para qualquer valor de TEB.

Na Figura 5, tem-se o resultado obtido para o desempenho de vazão relativa do sistema ADSL padrão e dos sistemas ADSL propostos com intervalos de retransmissão de 1 a 6, para velocidade de transmissão de 1696 kb/s em *downstream* e 640 kb/s em *upstream*. Neste gráfico, o desempenho de vazão relativa dos sistemas ADSL com ARQ é maior que o desempenho do ADSL padrão a partir de $1,0 \times 10^{-5}$, ademais a diferença chega à aproximadamente 30% para valores de TEB nas proximidades de $1,0 \times 10^{-4}$. Quanto à influência do intervalo de retransmissão no desempenho de vazão relativa do ADSL proposto, a partir da TEB de $1,6 \times 10^{-5}$ surgem diferenças na vazão relativa, mas novamente estas diferenças são pequenas (aproximadamente 5%) e não há intervalo de retransmissão predominante. As curvas de desempenho de vazão relativa dos sistemas ADSL com ARQ ilustradas neste gráfico não apresentaram valores para as taxas mais altas de erro de bit porque o resultado da simulação nestes pontos não convergiu.

Na Figura 6 é apresentado o resultado para o desempenho de vazão relativa do sistema ADSL padrão e dos sistemas ADSL propostos com intervalos de retransmissão de 1 a 6, para velocidade de transmissão em *downstream* e em *upstream* de 640 kb/s. Neste caso, a diferença entre o desempenho do sistema ADSL proposto e o desempenho do sistema ADSL padrão surge a partir de aproximadamente $1,6 \times 10^{-5}$, chegando a cerca de 40% para taxas de erro de bit da ordem de $2,0 \times 10^{-4}$. Outrossim, para a TEB de $1,0 \times 10^{-3}$, os sistemas ADSL com ARQ apresentam vazão relativa entre 15% e 20%, enquanto a vazão relativa do sistema ADSL padrão é próxima de zero. Quanto à variação do intervalo de retransmissão, surgem diferenças no desempenho da vazão relativa a partir da TEB aproximada de $1,0 \times 10^{-4}$. Mais uma vez estas diferenças são de aproximadamente 5% e não há intervalo de retransmissão predominante.

Quando a taxa de erro de bit é baixa, o desempenho do ADSL proposto é praticamente igual ao desempenho do ADSL padrão, conforme a Tabela 2, conquanto exista diferença mínima que não ultrapassou 0,5% para os casos simulados. Pode-se observar que, quanto menor a velocidade de transmissão, maior é esta diferença. Para as três velocidades de transmissão em *downstream* simuladas, a quantidade de sobrecarga no quadro ADSL padrão é igual a 3 bytes (2 bytes de redundância do código + 1 byte de sincronismo), enquanto que, no quadro ADSL com ARQ, é

igual a 4 bytes (2 bytes de redundância do código + 1 byte de sincronismo + 1 byte de controle). Diminuindo a velocidade de transmissão, diminui-se o tamanho do quadro, mas a quantidade de sobrecarga permanece a mesma. Portanto o espaço para transmissão de dados do usuário diminui e a relação entre a quantidade de sobrecarga e a quantidade de dados do usuário aumenta, conforme a Tabela 3. É importante observar também que a diferença entre as relações sobrecarga/dados do usuário no sistema ADSL com ARQ e no sistema ADSL padrão aumenta, à medida que a velocidade de transmissão diminui. Isso implica em que a diferença entre o espaço disponível para o usuário no quadro ADSL padrão e o espaço disponível para o usuário no quadro ADSL com HARQ é mais significativa para menores valores de velocidade de retransmissão, justificando as diferenças de desempenho mostradas na Tabela 2.

Comparando as implementações TCP *Reno*, *Tahoe* e *Vegas*, na Figura 7, percebe-se que o TCP Vegas obteve melhor desempenho de vazão relativa desde $2,5 \times 10^{-6}$ até valores próximos de $1,0 \times 10^{-4}$, evidenciando a influência das técnicas mais sofisticadas desta implementação. Comparando o TCP *Reno* e o TCP *Tahoe*, nota-se que os desempenhos de vazão relativa são similares até $1,0 \times 10^{-5}$. Deste ponto até $4,0 \times 10^{-5}$ para o sistema ADSL padrão, ou $5,0 \times 10^{-5}$ para o sistema ADSL com ARQ, o TCP *Reno* atingiu vazão relativa maior que a do TCP *Tahoe*. Deste ponto em diante, o TCP *Tahoe* passou a apresentar melhor desempenho.

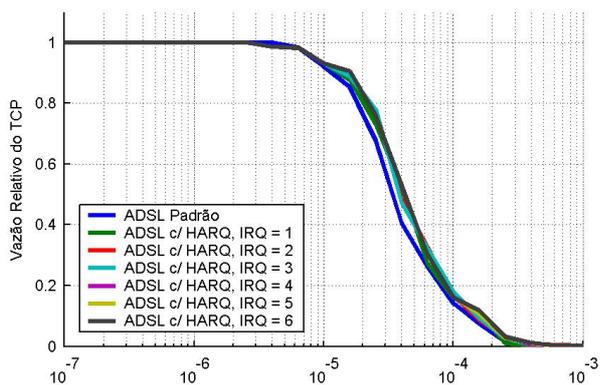


Fig. 4. Vazão relativa de sistema ADSL padrão e sistemas ADSL com HARQ para taxa de transmissão 6144 kb/s X 640 kb/s.

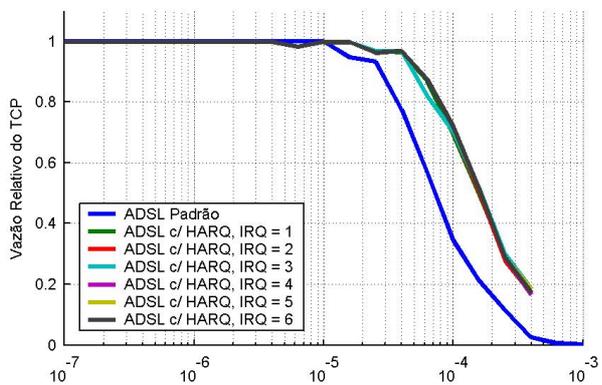


Fig. 5. Vazão relativa de sistema ADSL padrão e sistemas ADSL com HARQ para taxa de transmissão 1696 kb/s X 640 kb/s.

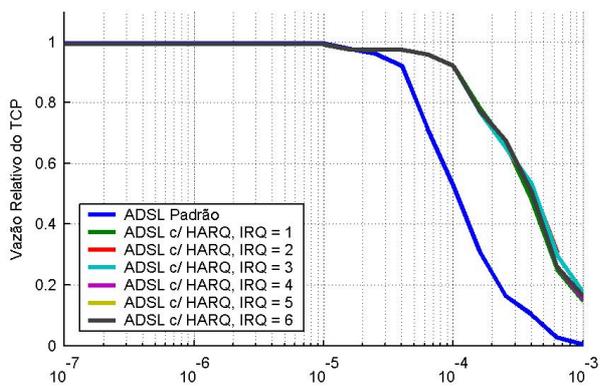


Fig. 6. Vazão relativa de sistema ADSL padrão e sistemas ADSL com HARQ para taxa de transmissão 640 kb/s X 640 kb/s.

TABELA 2
VAZÃO RELATIVA DE SISTEMAS ADSL PARA TAXA DE ERRO DE BIT DE 10^{-7}

| ADSL | Velocidade de Transmissão [kb/s] | Vazão Relativa |
|--------|----------------------------------|----------------|
| Padrão | 6.144 | 100,0000% |
| HARQ | 6.144 | 100,0000% |
| Padrão | 1.696 | 99,8969% |
| HARQ | 1.696 | 99,6702% |
| Padrão | 640 | 99,5134% |
| HARQ | 640 | 99,1961% |

TABELA 3
RELAÇÃO ENTRE BYTES DE SOBRECARGA E BYTES DE DADOS DO USUÁRIO.

| ADSL | Velocidade de Transmissão [kb/s] | Tamanho do Quadro [Bytes] | Sobrecarga [Bytes] | Dados do Usuário [Bytes] | Relação Sobrecarga / Dados do Usuário |
|--------|----------------------------------|---------------------------|--------------------|--------------------------|---------------------------------------|
| Padrão | 6.144 | 192 | 3 | 189 | 0,015873 |
| HARQ | 6.144 | 192 | 4 | 188 | 0,021277 |
| Padrão | 1.696 | 53 | 3 | 50 | 0,060000 |
| HARQ | 1.696 | 53 | 4 | 49 | 0,081633 |
| Padrão | 640 | 20 | 3 | 17 | 0,176470 |
| HARQ | 640 | 20 | 4 | 16 | 0,250000 |

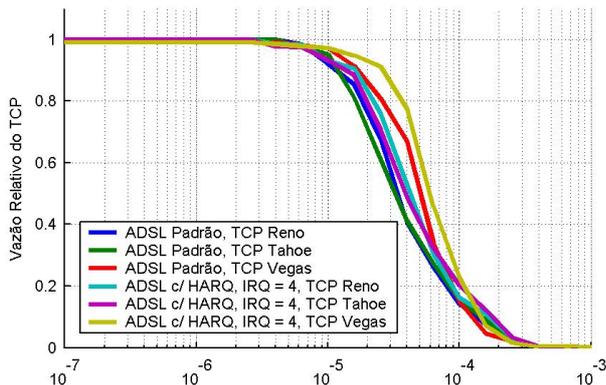


Fig. 7. Vazão relativa de sistema ADSL padrão e sistemas ADSL com HARQ para diferentes implementações TCP.

V. CONCLUSÕES

Conforme os resultados obtidos, observa-se que a utilização do esquema de controle de erro proposto neste trabalho melhora a vazão na comunicação de dados através de TCP sobre ATM em redes de acesso ADSL. Com a retransmissão de quadros, o protocolo TCP perde menos segmentos devido a erros, deixando de interpretar estas perdas como congestionamento e, conseqüentemente, deixa de reduzir a capacidade de transmissão.

Percebe-se a melhora do desempenho com a redução da velocidade de transmissão em *downstream*, independentemente do sistema utilizado. A explicação para este fenômeno é que, como o gráfico é dado pela taxa de erro de bit, a quantidade de erros em um quadro aumenta com o tamanho do quadro, que por sua vez depende da velocidade de transmissão. Para baixas taxas de erro, verificou-se que o desempenho do ADSL com o esquema de controle de erro proposto é semelhante ao desempenho do ADSL padrão. Quanto ao intervalo de retransmissão de quadros (IRQ), a definição do seu valor não demonstrou influenciar no desempenho do sistema ADSL com ARQ.

Considerando as implementações TCP do tipo *Reno*, *Tahoe* e *Vegas*, a implementação TCP *Vegas* alcançou melhores resultados tanto para o ADSL padrão, quanto para o ADSL com ARQ. O desempenho do TCP *Reno* e do TCP *Tahoe* foi semelhante.

REFERÊNCIAS

- [1] N. Nedev, "ATM Cell Error Performance of xDSL Under Impulse Noise," in *Proc. 4th IEEE Intl. Conf. Communications*, Helsinki, June 2001, vol. 4, pp. 1254-1258.
- [2] N. Nedev, "Data Errors in ADSL and SHDSL Systems due to Impulse Noise," in *Proc. IEEE Intl. Conf. Acoustics, Speech, and Signal Processing*, Orlando, May 2002, vol. 4, pp. 4048-4051.
- [3] D. Laurenson, "Performance of TCP/IP over ADSL subjected to impulse noise," in *Proc. 13th Intl. Symposium Services and Local Access*, Stockholm, June 2000, Section 8:1.
- [4] G. Lu, "The Performance of TCP over ATM on Lossy ADSL Networks," in *Proc. 25th IEEE Conf. Local Computer Networks*, Tampa, FL, October 2000, pp. 418-427.
- [5] X. He, "TCP Performance Analysis of a DMT-based ADSL System," in *Proc. 25th IEEE Conf. Local Computer Networks*, Tampa, FL, October 2000, pp. 439-440.
- [6] X. He, and H. Che, "TCP Performance Analysis and Optimization Over DMT Based ADSL Systems," in *Proc. 4th IEEE Intl. Conf. Communications*, Helsinki, June 2001, vol. 9, pp. 2882-2886.
- [7] X. He, and H. Che, "TCP Performance Analysis and Optimization over DMT Based ADSL Systems," *Computer Communications*, vol. 25, no. 3, pp. 322-328, February 2002.
- [8] H. Balakrishnan, "A Comparison of Mechanisms for Improving TCP Performance over Wireless Links," *IEEE/ACM Trans. Networking*, vol. 5, no. 6, pp. 756-769, December 1997.
- [9] H. Obata, "TCP Performance Analysis on Asymmetric Networks Composed of Satellite and Terrestrial Links," in *IEEE Intl. Conf. Network Protocols*, Osaka, November 2000, pp. 199-206.
- [10] J. Grotz, and G. A. Cope, "Modelling and Design of TCP/IP Based Services over ADSL and ATM," in *IEE Telecommunications Conf.*, no. 451, 1998, pp. 138-148.
- [11] R. J. Gurski, and C. L. Williamson, "TCP over ATM: Simulation Model and Performance Results," in *Proc. 15th Annual IEEE Intl. Phoenix Conf. Computers and Communications*, Phoenix, AZ, March 1996, pp. 328-335.
- [12] J. M. Cioffi, "Multi-channel Modulation," notas de aula. Disponível em: <<http://www.stanford.edu/class/ee379c/readerfiles/chap4.pdf>>
- [13] S. Lin, D. J. Costello Jr. e M. J. Miller, "Automatic-Repeat-Request Error-Control Schemes," *IEEE Comm. Magazine*, vol. 22, n. 12, pp. 5-17, December 1984.
- [14] F. Bizinelli, and W. Godoy Jr., "Proposal of a New Algorithm to Improve TCP Performance over ADSL," in *7th IASTED Intl. Conf. Internet and Multimedia Systems and Applications*, Honolulu, August 2003, pp. 324-327.
- [15] F. Bizinelli, and W. Godoy Jr., "Analysis of a Proposed Error Correction Algorithm over ADSL for TCP Applications," in *2nd IASTED Intl. Conf. Communication Systems and Networks*, Benalmádena, September 2003, pp. 223-226.
- [16] F. Bizinelli, "Contribuição ao Estudo de Novas Técnicas de Controle de Erro em Redes de Acesso ADSL," dissertação de mestrado, Curso de Pós-Graduação em Eng. Elétrica e Informática Industrial, Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná, Curitiba, Brasil, 2003.
- [17] S. B. Wicker, *Error Control Systems for Digital Communication and Storage*. Upper Saddle River: Prentice Hall, 1995.
- [18] A. A. Daraiseh, and C. W. Baum, "Decoder Error and Failure Probabilities for Reed-Solomon Codes: Decodable Vectors Method," *IEEE Trans. Communications*, vol. 46, no. 7, pp. 857-859, July 1998.