

Recuperação de Erros com Decisão de Retransmissão Seletiva ou Contínua por Previsão de Transbordo

Otto Carlos M. B. Duarte e Heliomar Medeiros de Lima

Em sistemas de comunicação de dados, o método de recuperação de erros mais usado é a correção por pedido de retransmissão. Em um ambiente com transmissão via satélite a altas velocidades e elevadas taxas de erro, as estratégias de pedido de retransmissão convencionais se mostram pouco eficientes. Este artigo apresenta e analisa o desempenho do protocolo HDLC-M_C-SREJ+REJ, que utiliza um esquema de recuperação de erros com decisão de pedido de retransmissão seletiva ou contínua baseada na condição de risco de transbordo iminente da memória. A idéia chave da estratégia é tirar proveito da disponibilidade de uma maior capacidade de memória usando o máximo possível a retransmissão seletiva, adiando assim o envio de um pedido de retransmissão contínua. Os resultados numéricos comprovam um melhor desempenho desta estratégia em relação aos protocolos convencionais. Na região de alto desempenho a estratégia apresenta um rendimento bastante próximo do máximo possível de se obter em estratégias com reconhecimento acumulativo.

1. Introdução

A possibilidade de difusão e transmissão a alta velocidade torna as comunicações de dados via satélite bastante atraentes. Associado a estas características o uso de um satélite geoestacionário tem o inconveniente do longo caminho percorrido pela informação. Dependendo da topologia da rede e/ou da localização do destinatário são necessários um, dois ou mais saltos. Entende-se por salto a porção de um enlace por satélite constituída por um lance de subida e o lance de descida subsequente. Isto leva a tempos de propagação elevados, cerca de 300 ms por salto.

A maioria dos sistemas de comunicação de dados emprega o método de correção por retransmissão, cujo sucesso se deve à grande robustez, eficiência, confiabilidade e facilidade de implementação de um código detector de erros. Dentre os protocolos que usam a correção de erros por retransmissão, o mais importante é o HDLC ("High-Level Data Link Control") que é um protocolo normalizado pela ISO [1]-[3]. A principal razão do seu sucesso é a sua transparência quanto à informação e sua formatação inteligente de quadros que permite com pouco "overhead" transmitir várias informações

O. C. M. B. Duarte é Professor da Universidade Federal do Rio de Janeiro — COPPE/EE UFRJ — Caixa Postal 68504, 21945, Rio de Janeiro, RJ.

H. M. de Lima é Engenheiro do Banco do Brasil — DEPRO/SUTEC, Rua Barão de São Francisco, 177, 20560, Rio de Janeiro, RJ.

de controle. Neste protocolo, uma recuperação de quadro de informação (quadro-l) errado pode ser iniciada no receptor pelo envio de um REJ $N(R)$, ou seja, um pedido de retransmissão contínua a partir do quadro de número $N(R)$, ou de um SREJ $N(R)$, ou seja, um pedido de retransmissão seletiva do quadro de número $N(R)$. Os quadros REJ $N(R)$ e SREJ $N(R)$, além de pedir a retransmissão do quadro de informação $N(R)$, reconhecem positivamente os quadros-l com número de seqüência menor ou igual a $N(R)-1$, ou seja, o reconhecimento é acumulativo. O envio de um quadro REJ $N(R)$ /SREJ $N(R)$ estabelece no receptor uma condição de exceção REJ/SREJ, que é eliminada com a recuperação do quadro-l de número $N(R)$.

Em um ambiente de longo tempo de propagação, alta velocidade e alta taxa de erro, as estratégias convencionais de recuperação de erros por pedido de retransmissão se mostram pouco eficientes [4], [5]. Por outro lado, o avanço da microeletrônica reduziu drasticamente o custo de armazenamento e processamento da informação, tornando economicamente interessante a concepção de estratégias de recuperação de erros onde otimiza-se o uso do canal de comunicação (recurso caro) à custa da necessidade de uma maior capacidade de armazenamento nas estações transceptoras.

O principal objetivo deste artigo é apresentar e analisar o desempenho de uma estratégia de recuperação de erros onde a idéia chave é tirar proveito de uma maior capacidade de armazenamento das estações para fazer o maior número possível de pedidos de retransmissão seletiva. A retransmissão contínua somente é usada ao se verificar uma condição de **transbordo iminente** de memória.

Primeiramente apresenta-se o modelo matemático que utiliza um processo semi-Markoviano de parâmetro discreto. Em seguida analisa-se o desempenho da estratégia proposta, para vários tamanhos de memória, e discutem-se os resultados obtidos.

2. Modelo Matemático

Para avaliar o rendimento das estratégias mencionadas neste trabalho definem-se estados para o receptor segundo a condição de exceção em que ele se encontra. O estado normal corresponde à ausência de condições de exceção e os estados excepcional e transitório são caracterizados pela presença das condições de exceção SREJ e REJ, respectivamente.

O rendimento do protocolo é a razão entre o número de quadros-l recebidos sem erro e o número total de quadros-l recebidos e será obtido pela média ponderada dos rendimentos em cada estado, onde os pesos são as probabilidades do receptor estar no respectivo estado. Por sua vez, a probabilidade do receptor se encontrar em cada estado depende das probabilidades condicionais de transição de um estado para outro e dos tempos de espera nesses estados.

Para calcular as probabilidades do receptor se encontrar em cada estado, modela-se o comportamento do receptor por um processo semi-Markoviano de parâmetro discreto, cuja seqüência de estados é representada por

$$X(0), X(1), X(2), \dots, X(n), X(n+1), \dots$$

onde $X(n)$, $n = 0, 1, 2, \dots$, é uma variável aleatória que indica o estado do receptor após a recepção do n -ésimo quadro-l.

Ao longo deste artigo considera-se que os quadros de informação têm o mesmo comprimento L ; que a ocorrência de erro nos diversos bits são eventos estatisticamente independentes e que o tempo de ida e volta da comunicação S é constante (a unidade de tempo é a duração de um quadro-l e assim S corresponde ao número de quadros enviados em avanço). Além disso, adotam-se as seguintes premissas: os quadros-l são sempre identificados pelo receptor imediatamente após a sua recepção, inclusive os quadros-l recebidos com erro; os quadros de supervisão e os quadros-l retransmitidos em resposta aos quadros de supervisão SREJ são transmitidos e recebidos sem erros. Para comunicações em ambientes com longos tempos de propagação (grandes valores de S), tais como em comunicações via satélite, os erros introduzidos por essas premissas são desprezíveis[6].

Finalmente, representa-se por P_{bc} a probabilidade de que um quadro-l seja recebido sem erros e por P_{be} a probabilidade de que esse quadro-l contenha pelo menos um bit errado, isto é, $P_{be} = 1 - P_{bc}$.

3. O Protocolo HDLC- M_S .SREJ+REJ

O protocolo HDLC-SREJ+REJ Estendido, proposto por Duarte e Lima[7], para utilização no ambiente de comunicações via satélite combina o uso do SREJ e do REJ. O principal método de recuperação empregado é a recuperação por SREJ. A recuperação por REJ somente é usada quando um quadro-l errado é recebido durante uma recuperação por SREJ, isto é, entre um envio de um SREJ e a recuperação do quadro-l solicitado. Este protocolo necessita de uma memória-tampão, no receptor, suficiente para armazenar $(S+1)$ quadros-l. Entretanto, mesmo dispondo de memórias-tampão mais extensas, o seu rendimento não se altera. Isto ocorre porque ao receber um quadro-l errado durante uma condição de exceção SREJ o receptor decide pelo pedido de retransmissão contínua REJ. Assim ao final da condição de exceção SREJ em andamento, ele envia um quadro REJ.

Para eliminar essa limitação este trabalho propõe o protocolo HDLC- M_S .SREJ+REJ, que tira proveito de uma maior disponibilidade de capacidade de memória para utilizar eficientemente a retransmissão seletiva SREJ. A idéia chave é usar o máximo possível a rejeição seletiva SREJ e adiar o envio do pedido de retransmissão contínua REJ. Assim, o receptor continua

enviando pedidos de retransmissão seletiva SREJ até que uma condição de **transbordo iminente** seja detectada (ver Fig. 1). O maior uso do pedido de retransmissão seletiva SREJ é feito à custa da utilização de uma maior capacidade de armazenamento. Esta estratégia requer no receptor uma memória-tampão com capacidade M_S vezes maior que o necessário para armazenar os quadros-1 transmitidos durante o tempo de ida e volta da comunicação (quadros enviados em avanço).

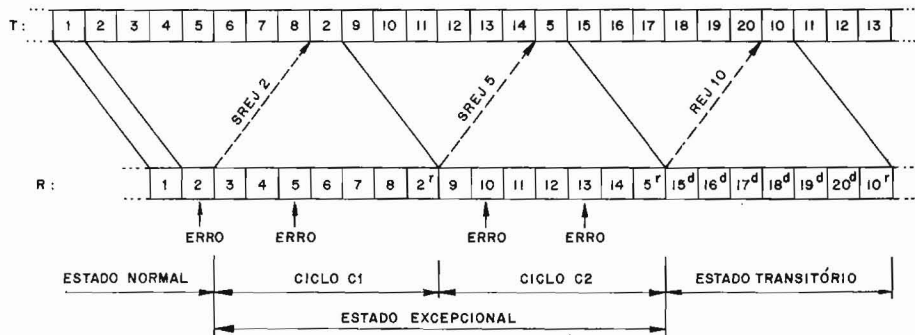


Figura 1. O protocolo HDLC- M_S . SREJ + REJ ($M_S=2$).

No algoritmo usado para recuperação de erros (ver Fig. 2), o receptor utiliza uma variável de estado $V(P)$ que indica o número de quadros errados recebidos e ainda efetivamente não recuperados (chamados **erros pendentes**). O valor de $V(P)$ é usado para detectar o risco de transbordo de memória e decidir quando o receptor deve enviar o pedido de retransmissão contínua REJ. Caso a variável $V(P)$ assumira um valor maior que M_S , o próximo pedido a ser enviado é o de retransmissão contínua REJ. Isto é, o REJ somente será enviado se durante uma condição de exceção SREJ o número de erros pendentes for maior que M_S .

No estado normal, ao detectar um quadro-1 errado o receptor envia um SREJ, passa para o estado excepcional e uma condição de exceção SREJ é estabelecida. Cada condição de exceção SREJ será chamada neste artigo de **ciclo** do estado excepcional. Se durante esta primeira condição de exceção SREJ todos os quadros forem recebidos corretamente (zero erro) o receptor volta para o estado normal. Entretanto, se ao final dessa condição de exceção SREJ o valor de $V(P)$ for maior que zero e menor que M_S o receptor envia um SREJ solicitando a retransmissão do erro pendente mais antigo (uma nova condição de exceção é estabelecida) e faz uma transição virtual para o mesmo estado excepcional.

Por outro lado, se durante qualquer ciclo do estado excepcional o valor de $V(P)$ ultrapassar M_S , ao final desse ciclo o receptor libera os quadros-1 recebidos corretamente em seqüência, envia um quadro de supervisão REJ $N(R)$, descarta os quadros-1 com número de seqüência superior a $N(R)$ armazenados na memória-tampão, atribui o valor 0(zero) para $V(P)$, e passa ao

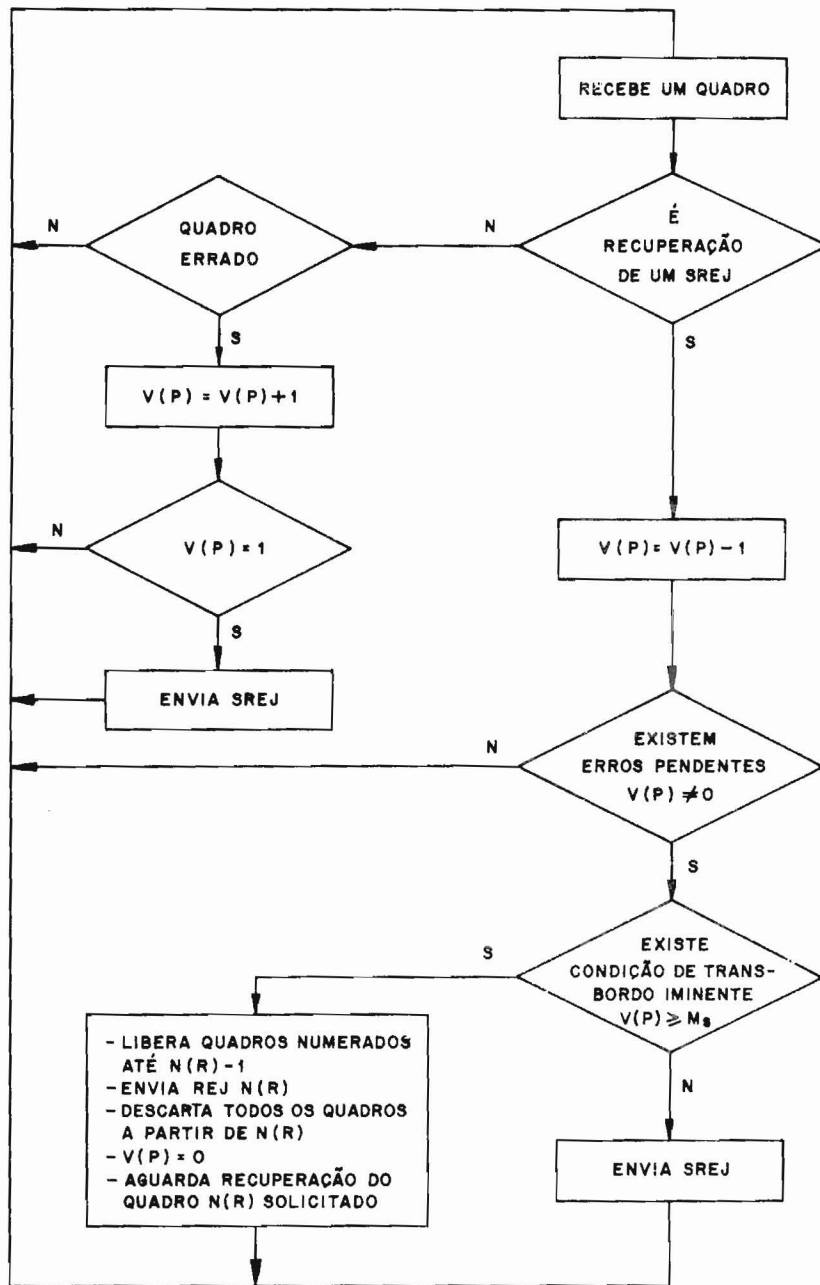


Figura 2. Fluxograma simplificado da estratégia HDLC – M_s . SREJ + REJ.

estado transitório. Assim, a ocorrência de um ciclo do estado excepcional com M_S quadros-I errados implica necessariamente em uma transição para o estado transitório, ao final deste ciclo. Portanto, o receptor só passa do estado excepcional para o normal se conseguir recuperar todos os quadros-I errados utilizando apenas a retransmissão seletiva SREJ, sem que o valor de $V(P)$ tenha em qualquer instante superado M_S .

Durante cada ciclo, o quadro-I cuja retransmissão foi solicitada é contado como mais um erro pendente, mas ao final desse ciclo o número de erros pendentes é diminuído de 1(um) em virtude da recepção correta do quadro-I retransmitido. Logo, para $M_S > 1$, a ocorrência de uma condição de exceção SREJ com somente um quadro-I errado, causa apenas uma transição virtual para o mesmo estado excepcional e acrescenta um ciclo a esse estado, sem alterar o valor de $V(P)$, isto é, os valores de $V(P)$ antes e depois do ciclo serão iguais. Assim, o estado excepcional pode ter um número indefinido de ciclos com um quadro-I errado.

O receptor descarta todos os quadros-I recebidos entre o envio do REJ e a recuperação do primeiro quadro-I retransmitido em resposta a esse pedido de retransmissão contínua. Isto é, durante uma condição de exceção REJ apenas um quadro-I é aceito: aquele cuja recuperação elimina essa condição. Se este quadro-I for recebido com erro, retransmite-se o mesmo REJ até conseguir sua recuperação, quando então o receptor passa para o estado normal. A cada envio do REJ uma nova condição de exceção REJ é estabelecida e o receptor faz uma transição virtual para o próprio estado transitório. Entre o envio do primeiro REJ $N(R)$ e a recepção correta do quadro $N(R)$ todos os demais quadros-I são descartados.

Tendo em vista que do estado normal (N) o receptor passa sempre para o excepcional (E) e, do estado transitório (T) sempre para o normal, tem-se que

$$P(E|N) = P(N|T) = 1 \quad (1)$$

onde $P(B|A)$ representa a probabilidade de transição de A para B dado que houve uma transição (probabilidade condicional de transição).

Do estado excepcional o receptor tanto pode passar para o estado normal quanto para o transitório e as probabilidades condicionais de transição do estado excepcional para esses estados dependem do valor de M_S . O cálculo dessas probabilidades bem como o do número de médio de ciclos do estado excepcional envolvem as probabilidades de ocorrer cada uma das possíveis seqüências de ciclos do estado excepcional. O número dessas seqüências e a complexidade desses cálculos aumentam consideravelmente à medida que M_S aumenta[8].

Os tempos médios de espera nos estados transitório, normal e excepcional são dados por

$$E[t_T] = \sum_{i=1}^{\infty} i \cdot (S+1) P_{be}^{i-1} P_{bc} = \frac{(S+1)}{P_{bc}}; \quad (2)$$

$$E[t_N] = \frac{1}{P_{be}}; \quad (3)$$

e

$$E[t_E] = E[n_e](S+1), \quad (4)$$

onde $E[n_e]$ é o número médio de ciclos do estado excepcional.

O rendimento R_e deste protocolo é a média ponderada dos rendimentos em cada um dos estados, logo

$$R_e = P(N) \cdot P_{bc} + P(E) \cdot \frac{A+1}{S+1} + P(T) \cdot \frac{1}{E[t_T]} \quad (5)$$

onde P_{bc} , $(A+1)/(S+1)$ e $1/E[t_T]$ são os rendimentos da estratégia nos estados normal, excepcional e transitório, respectivamente, e A é o número médio de quadros-l recebidos corretamente (e não descartados) por ciclo do estado excepcional. Em (5), $P(N)$, $P(E)$ e $P(T)$ denotam as probabilidades de que o receptor se encontre, respectivamente, nos estados N, E e T, em regime estacionário.

Usando as propriedades do processo semi-Markoviano obtém-se,

$$P(N) = \frac{1}{1 + P_{be}(S+1)(E[n_e] + P(T|E))}; \quad (6)$$

$$P(E) = \frac{P_{be} \cdot E[n_e](S+1)}{1 + P_{be}(S+1)(E[n_e] + P(T|E))}; \quad (7)$$

$$P(T) = \frac{P_{be} \cdot P(T|E) \cdot (S+1)}{1 + P_{be} \cdot (S+1) \cdot (E[n_e] + P(T|E))}. \quad (8)$$

Substituindo essas probabilidades em (5), o rendimento desta estratégia pode ser escrito como

$$R_e = \frac{P_{bc} + P_{be} \cdot [E[n_e] \cdot (A+1) + P(T|E)]}{1 + P_{be} \cdot [E[t_E] + E[t_T] \cdot P(T|E)]} \quad (9)$$

A seguir serão obtidas as expressões para os valores de $E[n_e]$, A e $P(T|E)$ para $M_S = 2, 3$ e 4 [8].

Caso $M_S = 2$

O receptor necessita de uma memória-tampão com $2.(S+1)$ registros, ou seja, com capacidade para $2.(S+1)$ quadros-l, e só decide enviar um REJ no momento em que completar o terceiro **erro pendente**. Denominando de **ciclo C_i** aquele durante o qual i quadros são recebidos com erro e de **ciclo $CT(j)$** aquele no qual j ou mais quadros são recebidos com erro, pode-se observar que as probabilidades P_i e $PT(j)$ de um dado ciclo ser um ciclo C_i ou ser um ciclo $CT(j)$ são, respectivamente,

$$P_i = \binom{S}{i} \cdot P_{be}^i \cdot P_{bc}^{S-i} \quad (10)$$

e

$$PT(j) = \sum_{i=j}^S \binom{S}{i} \cdot P_{be}^i \cdot P_{bc}^{S-i} \quad (11)$$

onde $\binom{S}{i}$ denota a combinação de S elementos tomados i a i .

Durante cada ciclo do estado excepcional os seguintes eventos definem o próximo estado do receptor:

- nenhum quadro errado é recebido (ciclo C_0) e o receptor volta ao estado normal;
- apenas um quadro errado é recebido (ciclo C_1), o receptor envia outro SREJ e continua no estado excepcional (a cada ocorrência do ciclo C_1 , o estado excepcional aumenta um ciclo);
- dois ou mais quadros errados são recebidos, ou seja, tem-se um ciclo $CT(2)$, o receptor envia um REJ e passa para o estado transitório, ao final da condição de exceção SREJ.

O estado excepcional admite, portanto, dois tipos de seqüência de ciclos:

caso a: uma seqüência do tipo $C_1^n.C_0$, $n \geq 0$, ou seja, uma seqüência composta por n ciclos C_1 seguidos por um ciclo C_0 , cuja ocorrência implica numa transição para o estado normal;

caso b: uma seqüência do tipo $C_1^n.CT(2)$, $n \geq 0$ ou seja, uma seqüência composta por n ciclos C_1 seguidos por um ciclo $CT(2)$, cuja ocorrência implica numa transição para o estado transitório.

Para calcular o número médio de ciclos do estado excepcional é necessário calcular a probabilidade desse estado ter i ciclos. Seja $P_e(i)$ a probabilidade do estado excepcional ter i ciclos. Neste caso, o tempo de espera no estado excepcional é $i.(S+1)$ unidades de tempo.

Então

$$P_e(i) = P_1^{i-1} (1 - P_1), i = 1, 2, 3, \dots \quad (12)$$

Logo, o número médio de ciclos do estado excepcional é dado por

$$E[n_e] = \sum_{i=1}^{\infty} i \cdot P_e(i) = \sum_{i=1}^{\infty} i \cdot (1 - P_1) \cdot P_1^{i-1} = \frac{1}{1 - P_1} \quad (13)$$

A probabilidade condicional de transição do estado excepcional para o estado transitório é

$$P(T|E) = 1 - \sum_{i=1}^{\infty} P_0 \cdot P_1^{i-1} = 1 - \frac{P_0}{1 - P_1} \quad (14)$$

As seqüências de ciclos do estado excepcional são do tipo $C_1^n C_0$ ou $C_1^n CT(2)$, $n \geq 0$. Logo, nenhuma seqüência do estado excepcional termina no ciclo C_1 . Isto implica que todos os quadros-1 armazenados durante um ciclo C_1 são liberados antes do envio do REJ. Por outro lado, nos ciclos $CT(2)$ apenas os quadros-1 recebidos corretamente antes do primeiro erro são liberados, os demais serão descartados por ocasião do envio do REJ.

Então, o número médio de quadros-1 corretos recebidos e liberados por ciclo do estado excepcional (cada ciclo gasta $S+1$ unidades de tempo), é dado por

$$\begin{aligned} A &= S \cdot P_0 + 2 \cdot \frac{S-1}{2} \cdot P_1 + \frac{S-2}{3} \cdot P_2 + \frac{S-3}{4} \cdot P_3 + \dots + \frac{S-S}{S+1} \cdot P_S = \\ &= \sum_{i=0}^S \frac{S-i}{i+1} \cdot P_i + \frac{S-1}{2} \cdot P_1 \end{aligned} \quad (15)$$

O rendimento dessa estratégia é então dado por (9), com $E[t_T]$, $E[t_E]$, $E[n_e]$, $P(T|E)$ e A sendo dados por (2), (4), (13), (14) e (15), respectivamente.

Caso $M_S = 3$

Neste caso, o receptor admite até três erros pendentes no estado excepcional e portanto o quadro REJ somente será enviado se em algum instante existir mais de três erros pendentes. É assim necessário que se disponha de uma memória-tampão para $3 \cdot (S+1)$ quadros-1 no receptor.

As alterações em relação ao caso $M_S = 2$ correspondem ao tempo médio de espera no estado excepcional, ao número médio de quadros-1 recebidos corretamente e não descartados, por ciclo do estado excepcional, e às probabilidades de transição do estado excepcional para os estados normal e transitório. Para calcular esses valores é necessário calcular a probabilidade do estado excepcional ter exatamente i ciclos. Para calcular essa probabilidade

define-se que uma seqüência de ciclos do estado excepcional **termina** em $C_{i_1} \dots C_{i_2}$, quando há apenas um erro pendente antes do início do ciclo C_{i_1} e C_{i_2} é o último ciclo desse estado.

Este cálculo será dividido em dois casos:

caso a: quando a seqüência de ciclos do estado excepcional termina no ciclo C_0 e o receptor volta ao estado normal. Esta seqüência é do tipo $C_1^n \cdot (C_2 \cdot C_0)^{n_1} \cdot C_0$, com $n, n_1 \geq 0$. Ocorrendo C_2 , C_0 deve ocorrer antes de um novo C_2 . Além disso, entre dois ciclos quaisquer pode ocorrer um número indefinido de ciclos C_1 , inclusive entre C_2 e C_0 e entre dois ciclos C_0 . A probabilidade desta seqüência ter i ciclos é dada por

$$\begin{aligned} P_a(1) &= P_0 \\ P_a(2) &= P_1 \cdot P_0 \\ P_a(3) &= P_1^2 \cdot P_0 + P_2 \cdot P_0^2 \end{aligned}$$

$$P_a(4) = P_1^3 \cdot P_0 + 3 \cdot P_1 \cdot P_2 \cdot P_0^2$$

⋮

$$P_a(i) = \sum_{j=0}^{\infty} \binom{i-1}{2j} \cdot (P_2 \cdot P_0)^j \cdot P_1^{i-1-2j} \cdot P_0, i \geq 1 \quad (16)$$

caso b: o receptor passa para o estado transitório, com o estado excepcional terminando em uma das seguintes seqüências de ciclos:

$$(b_1) C_2 \cdot C_1^n \cdot CT(2), n \geq 1;$$

$$(b_2) C_2 \cdot CT(2) \text{ e}$$

$$(b_3) C_1^n \cdot CT(3) \text{ ou } C_2 \cdot C_0 \cdot C_1^n \cdot CT(3), n \geq 0$$

As probabilidades do estado excepcional ter i ciclos nesses casos são dadas por

$$P_{b_1}(i) = \sum_{j=0}^{\infty} \binom{i-2}{1+2j} (P_2 P_0)^j P_1^{i-2-2j} \cdot P_2 \cdot PT(2), i \geq 3 \quad (17)$$

$$P_{b_2}(i) = \sum_{j=0}^{\infty} \binom{i-2}{2j} \cdot (P_2 \cdot P_0)^j \cdot P_1^{i-2-2j} \cdot P_2 \cdot PT(2), i \geq 2 \quad (18)$$

$$P_{b_3}(i) = \sum_{j=0}^{\infty} \binom{i-1}{2j} \cdot (P_2 \cdot P_0)^j \cdot P_1^{i-1-2j} \cdot PT(3), i \geq 1. \quad (19)$$

O número médio de ciclos do estado excepcional é dado por

$$E[n_e] = \sum_{i=0}^{\infty} i(P_a(i) + P_{b_1}(i) + P_{b_2}(i) + P_{b_3}(i)) =$$

$$= \sum_{i=1}^{\infty} i \left(\sum_{j=0}^{\infty} \binom{i-1}{2j} P_1 (P_0 + PT(3))^j + \binom{i-1}{1+2j} P_2 PT(2)^j (P_2 P_0)^j P_1^{i-2-2j} \right) \quad (20)$$

Logo

$$E[n_e] = \frac{(P_0 + PT(3)) \cdot (1+P_x)}{(1-P_1)^2 \cdot (1-P_x)^2} + \frac{2 \cdot P_2 \cdot PT(2)}{(1-P_1)^3 \cdot (1-P_x)^2} \quad (21)$$

onde

$$P_x = \frac{P_2 \cdot P_0}{(1-P_1)^2} \quad (22)$$

A probabilidade condicional de transição do estado excepcional para o estado transitório é dada por

$$\begin{aligned} P(T|E) &= 1 - \sum_{i=1}^{\infty} P_d(i) = 1 - \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=0}^{\infty} \binom{i-1}{2j} (P_2 \cdot P_0)^j \cdot P_1^{i-1-2j} \cdot P_0 = \\ &= 1 - \frac{P_0}{(1-P_1) \cdot (1-P_x)} \end{aligned} \quad (23)$$

No caso (b_3), o número $N(R)$ contido no REJ corresponde ao primeiro quadro-I errado recebido no último ciclo do estado excepcional. Logo, todos os quadros-I recebidos no penúltimo ciclo do estado excepcional são liberados antes do envio do quadro REJ. Entretanto, nos casos (b_1) e (b_2) esse número $N(R)$ corresponde a um quadro-I errado recebido no penúltimo ciclo do estado excepcional: os quadros-I recebidos corretamente após o quadro $N(R)$ são descartados quando o receptor envia o REJ. O penúltimo ciclo pode ser C_1 (b_1) ou do tipo C_2 (b_2).

Sejam P_{b_1} e P_{b_2} as probabilidades da seqüência de ciclos do estado excepcional terminar em $C_2, C_1, CT(2)$ ou $C_2, CT(2)$, respectivamente. Então

$$P_{b_1} = \sum_{i=3}^{\infty} P_{b_1}(i) = \frac{P_1 \cdot P_2 \cdot PT(2)}{(1-P_1)^2 \cdot (1-P_x)} \quad (24)$$

$$P_{b_2} = \sum_{i=2}^{\infty} P_{b_2}(i) = \frac{P_2 \cdot PT(2)}{(1-P_1) \cdot (1-P_x)} \quad (25)$$

O número médio de quadros-I recebidos corretamente, e não descartados, por ciclo do estado excepcional é dado por

$$A = \sum_{i=0}^{\infty} \frac{S-i}{i+1} \cdot P_i + (2P_2 \left(1 - \frac{P_{b_1} + P_{b_2}}{E[n_e] PT(2)} \right) \frac{P_{b_2}}{E[n_e]} \cdot \frac{S-2}{3})$$

$$+ \left(P_1 - \frac{P_{b1}}{E[n_e]} \right) \cdot \frac{S-1}{2} - \frac{P_{b1} + P_{b2}}{E[n_e] PT(2)} \cdot \sum_{i=2}^S \frac{S-i}{i+1} \cdot P_i \quad (26)$$

O rendimento da estratégia é dado por (9), com $E[t_T]$, $E[t_E]$, $E[n_e]$, $P(T|E)$ e A sendo dados por (2), (4), (21), (23) e (26), respectivamente.

Caso $M_S = 4$

Quando $M_S = 4$, o receptor admite até quatro erros pendentes e necessita de uma memória-tampão para $4 \cdot (S+1)$ quadros-l. O quadro REJ somente será enviado se em algum instante o número de erros pendentes for superior a quatro. O número $N(R)$ contido nesse REJ pode corresponder a um quadro-l errado recebido no antepenúltimo, no penúltimo ou no último ciclo do estado excepcional, dependendo da configuração de quadros-l errados recebidos. Todos os quadros recebidos no estado excepcional após o de número $N(R)$ são descartados.

O receptor passa para o estado normal quando a seqüência de ciclos do estado excepcional termina em C_0 (**caso a**). A probabilidade desta seqüência ter i ciclos é dada por

$$P_a(i) = \sum_{j=0}^{\infty} \sum_{k=0}^{\infty} \left[\binom{j+2k}{2k} + \binom{k+1}{1} \binom{j+2k}{2+2k} \right] \binom{i-1}{2j+3k} (P_3 P_0^2)^k (P_2 \cdot P_0)^j P_1^{i-1-2j-3k} P_0, i \geq 1 \quad (27)$$

Existem nove tipos básicos de seqüências de ciclos do estado excepcional que terminam em uma transição para o estado transitório:

caso b: seqüências de ciclos terminando em $CT(4)$;

caso c: seqüências de ciclos terminando em $C_2 \cdot CT(3)$

caso d: seqüências de ciclos terminando em $C_2 \cdot C_1^n \cdot CT(3)$, $n \geq 1$;

caso e: o estado excepcional termina em uma das seguintes seqüências:

$e_1: C_3 \cdot CT(2)$;

$e_2: C_3 C_1^{n_1} C_0 C_1^{n_2} C_2 CT(2)$, $n_1, n_2 \geq 0$, ou, $C_2 \cdot C_1^{n_1} \cdot C_2 \cdot CT(2)$, $n_1 \geq 0$

caso f: seqüências de ciclos com uma das seguintes terminações:

$f_1: C_3 \cdot C_1 \cdot CT(2)$;

$f_2: C_3 \cdot C_1^{n_1} C_0 \cdot C_1^{n_2} \cdot C_2 C_1 CT(2)$, $n_1, n_2 \geq 0$, ou,

$C_2 \cdot C_1^{n_2} \cdot C_2 \cdot C_1 \cdot CT(2)$, $n_2 \geq 0$;

caso g: o estado excepcional termina em uma das seguintes seqüências:

$$g_1: C_3 \cdot C_1^n \cdot CT(2), n \geq 2;$$

$$g_2: C_3 \cdot C_1^{n_1} C_0 \cdot C_1^{n_2} C_2 \cdot C_1^n \cdot CT(2), \text{ ou,} \\ C_2 C_1^{n_2} \cdot C_2 C_1^n CT(2), n_1, n_2 \geq 0, n \geq 2;$$

caso h: o estado excepcional termina em uma das seguintes seqüências:

$$h_1: C_3 \cdot C_0 \cdot CT(3);$$

$$h_2: C_3 \cdot C_1^{n_1} C_0 \cdot C_1^{n_2} C_2 \cdot C_0 \cdot CT(3), \text{ ou, } C_2 \cdot C_1^{n_2} \cdot C_2 \cdot C_0 \cdot CT(3), n_1, n_2 \geq 0;$$

caso i: O estado excepcional termina em uma das seguintes seqüências:

$$i_1: C_3 \cdot C_1^n C_0 \cdot CT(3), n \geq 1;$$

$$i_2: C_3 C_1^{n_1} C_0 C_1^{n_2} C_2 C_1^n C_0 CT(3), \text{ ou,} \\ C_2 C_1^{n_2} C_2 C_1^n C_0 CT(3), n_1, n_2 \geq 0, n \geq 1;$$

caso j: o estado excepcional termina em uma das seguintes seqüências:

$$j_1: C_3 C_1^{n_1} \cdot C_0 C_1^n CT(3), n \geq 1, n_1 \geq 0;$$

$$j_2: C_3 C_1^{n_1} C_0 C_1^{n_2} C_2 C_1^{n_3} C_0 C_1^n CT(3), \text{ ou,} \\ C_2 C_1^{n_2} C_2 C_1^{n_3} C_0 C_1^n CT(3), n \geq 1 \text{ e } n_i \geq 0.$$

Apenas no **caso b** o N(R) contido no quadro REJ corresponde a um quadro-l errado do último ciclo. Nos casos **c, d, e** e **j** esse número refere-se a um quadro-l errado recebido no penúltimo ciclo enquanto nos casos **f, g, h** e **i**, o REJ solicita a retransmissão a partir de um quadro-l recebido com erro no antepenúltimo ciclo do estado excepcional. Estes quatro casos, **f, g, h** e **i**, são os que mais degradam o desempenho da estratégia, pois o réceptor passa muito tempo recebendo e armazenando quadros-l que são descartados quando o REJ é enviado.

As probabilidades dessas seqüências terem *i* ciclos são dadas por

$$P_b(i) = P_a(i) \cdot \frac{PT(4)}{P_0} \quad (28)$$

$$P_{c+d}(i) = \sum_{j=0}^{\infty} \sum_{k=0}^{\infty} \left[\binom{j+2k}{2k} + \binom{k+1}{1} \binom{j+2k}{2+2k} \right] \binom{i-1}{1+2j+3k} \cdot (P_3 P_0^2)^k \cdot (P_2 P_0)^j \cdot P_1^{i-2-2j-3k} P_2 \cdot PT(3), i \geq 2 \quad (29)$$

$$P_{(e+f+g)_1}(i) = P_{c+d}(i) \cdot \frac{P_3 \cdot PT(2)}{P_2 \cdot PT(3)}, \quad (30)$$

$$P_{(e+f+g)_2}(i) = \sum_{j=0}^{\infty} \sum_{k=0}^{\infty} \left[\binom{j+1+2k}{1+2k} + \binom{k+1}{1} \binom{j+1+2k}{3+2k} \right] \cdot \left[\binom{i-1}{2+2j+3k} P_2 + \binom{i-1}{3+2j+3k} P_1^{-1} P_3 P_0 \right] \cdot (P_3 P_0^2)^k \cdot (P_2 P_0)^j P_1^{i-3-2j-3k} P_2 P_T(2), \quad i \geq 3 \quad (31)$$

$$P_{(h+i+j)_1}(i) = \sum_{j=0}^{\infty} \sum_{k=0}^{\infty} \left[\binom{j+2k}{2k} + \binom{k+1}{1} \binom{j+2k}{2+2k} \right] \cdot \binom{i-1}{2+2j+3k} \cdot (P_3 P_0^2)^k (P_2 P_0)^j P_1^{i-3-2j-3k} P_3 P_0 P_T(3), \quad (32)$$

$$P_{(h+i+j)_2}(i) = \sum_{j=0}^{\infty} \sum_{k=0}^{\infty} \left[\binom{j+1+2k}{1+2k} + \binom{k+1}{1} \binom{j+1+2k}{3+2k} \right] \left[\binom{i-1}{3+2j+3k} P_2 + \binom{i-1}{4+2j+3k} P_1^{-1} P_3 P_0 \right] \cdot (P_2 P_0)^j \cdot P_1^{i-3-2j-3k} \cdot P_2 P_0 P_T(3), \quad i \geq 4 \quad (33)$$

onde

$$P_{x+y}(i) = P_x(i) + P_y(i), \quad \text{para } x, y = c, d, \dots, j, \quad (34)$$

$$P_x(i) = P_{x_1}(i) + P_{x_2}(i), \quad \text{para } x = e, f, \dots, j, \quad (35)$$

$$P_{(x+y)_1}(i) = P_{x_1}(i) + P_{y_1}(i), \quad \text{para } x, y = e, \dots, j \quad (36)$$

e

$$P_{(x+y)_2}(i) = P_{x_2}(i) + P_{y_2}(i), \quad \text{para } x, y = e, \dots, j \quad (37)$$

Dada uma seqüência de ciclos, a probabilidade de ela ser de um dos tipos acima é dada por

$$P_x = \sum_{i=1}^{\infty} P_x(i), \quad \text{para } x = b, c, \dots, j. \quad (38)$$

A probabilidade condicional de transição do estado excepcional para o estado transitório é dada por

$$P(T|E) = 1 - \sum_{i=1}^{\infty} P_a(i). \quad (39)$$

com $P_a(i)$ dado por (27).

As probabilidades de ocorrer cada um dos casos de c a j são dadas por ($i = 1, 2$)

$$P_c = (1-P_1) \cdot P_{(c+d)} \quad (40)$$

$$P_d = P_1 \cdot P_{(c+d)} \quad (41)$$

$$P_{e_i} = (1-P_1) \cdot P_{(e+f+g)_i} \quad (42)$$

$$P_{f_i} = P_1(1-P_1) \cdot P_{(e+f+g)_i} \quad (43)$$

$$P_{g_i} = P_1^2 \cdot P_{(e+f+g)_i} \quad (44)$$

$$P_{h_i} = (1-P_1)^2 \cdot P_{(h+i+j)_i} \quad (45)$$

$$P_{i_i} = P_1 \cdot (1-P_1) \cdot P_{(h+i+j)_i} \quad (46)$$

$$P_{j_i} = P_1 \cdot P_{(h+i+j)_i} \quad (47)$$

O número médio de ciclos do estado excepcional é

$$E[n_e] = \sum_{i=1}^{\infty} i(P_a(i) + P_b(i) + P_{c+d}(i) + P_{e+f+g}(i) + P_{h+i+j}(i)). \quad (48)$$

O número médio, A , de quadros-1 recebidos corretamente e não descartados, por ciclo do estado excepcional, é dado por

$$\begin{aligned} A = & \sum_{i=0}^S \frac{S-1}{i+1} \cdot P_i + 3P_3 \left(1 - \frac{P_{e+f+g}}{E[n_e]PT(2)} - \frac{P_{h+i+j} + P_{c+d}}{E[n_e]PT(3)} \right) \frac{S-3}{4} + P_1 \frac{S-1}{2} + \\ & + 2P_2 \left(1 - \frac{P_{e+f+g}}{E[n_e]PT(2)} \right) \frac{S-2}{3} - \frac{2P_{e1} + P_{f1} + P_{h1} + P_c}{E[n_e]} \cdot \frac{S-3}{4} - \frac{2P_{e2} + P_{f2} + P_{h2} + P_c}{E[n_e]} \cdot \frac{S-2}{3} \\ & - \frac{3P_g + 2P_f + P_i + P_j + P_c}{E[n_e]} \cdot \frac{S-1}{2} - \frac{P_h + P_i}{E[n_e]} \cdot S - \left(\frac{P_{e+f+g}}{E[n_e] \cdot PT(2)} + \frac{P_{h+i+j} + P_{c+d}}{E[n_e]PT(3)} \right) \sum_{i=3}^S \frac{S-1}{i+1} P_i \end{aligned} \quad (49)$$

Neste caso o rendimento também é dado por (9), com $P(T|E)$, $E[n_e]$ e A dados por (39), (48) e (49), respectivamente.

4. Resultados Numéricos

A Fig. 3 mostra o rendimento do protocolo HDLC-SREJ+REJ Estendido proposto em [7] e do protocolo HDLC-M_S.SREJ+REJ, para $M_S = 2, 3$ e 4.

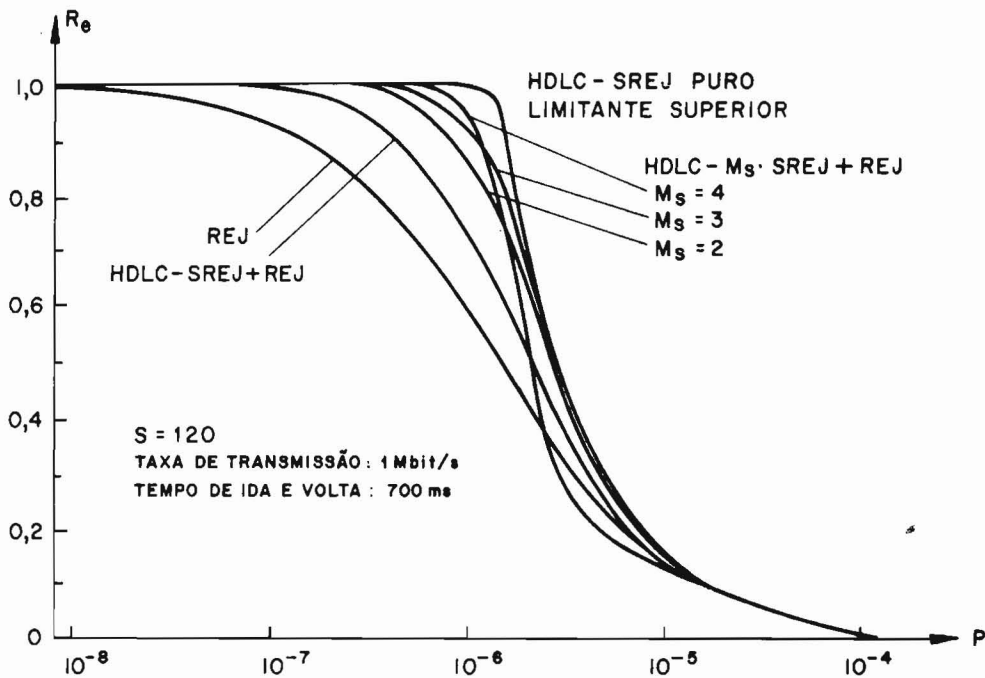


Figura 3. Rendimento do protocolo HDLC- M_S . SREJ+REJ em função da taxa de bits.

Nesta figura foi plotado também, para efeito de comparação, um limitante superior do protocolo HDLC-SREJ Puro, que se serve unicamente do pedido de retransmissão seletiva (SREJ), tem uma memória infinita, e cujo rendimento é dado por [4]

$$R_e \leq \min \left(P_{bc}, \frac{1}{P_{be} \cdot (S+1)} \right). \quad (50)$$

Pode-se notar que o rendimento do protocolo proposto, na região de alto desempenho, se aproxima do limitante superior do HDLC-SREJ Puro à medida que se dispõe de mais memória. Entretanto, para $M_S = 4$ o rendimento cai abruptamente a partir de um certo valor da taxa de erro de bits. Esta queda se dá na região onde prevalece a probabilidade de ocorrência dos casos que envolvem um maior retardo no estabelecimento da condição de transbordo iminente e portando um maior número de quadros descartados (casos f, g, h e i). Nesta região seria mais vantajoso decidir enviar o REJ quando o número de erros pendentes chegasse a quatro (e não após ultrapassar quatro). Assim, nessa região de taxa de erro, uma estratégia que estabeleça uma condição de transbordo iminente com a simples ocorrência de um ciclo com três ou mais erros, ou seja, um ciclo CT(3), apresenta um rendimento maior que o protocolo HDLC-4.SREJ+REJ.

A Fig. 4 mostra a melhora do rendimento da nova estratégia comparada com o protocolo HDLC-REJ. Para $M_S = 3$, nota-se uma melhora de até 34% no desempenho, em transmissões via satélite (tempo de ida e volta 700 ms) a alta velocidade (1 Mbit/s). Esta melhora seria obtida à custa de uma memória de 2,8 Mbits ($M_S = 3$) ao invés dos 700 kbits exigidos pelo HDLC-REJ. Observa-se ainda nesta figura uma melhora acentuada do rendimento, seguida de uma queda tanto mais abrupta quanto maior o valor de M_S . A melhora ocorre na região de alto desempenho. No caso $M_S = 4$, o protocolo HDLC-REJ chega a ser mais eficiente do que o protocolo proposto. No entanto, isto ocorre em uma região onde o rendimento é tão baixo que não se justifica o uso destas estratégias.

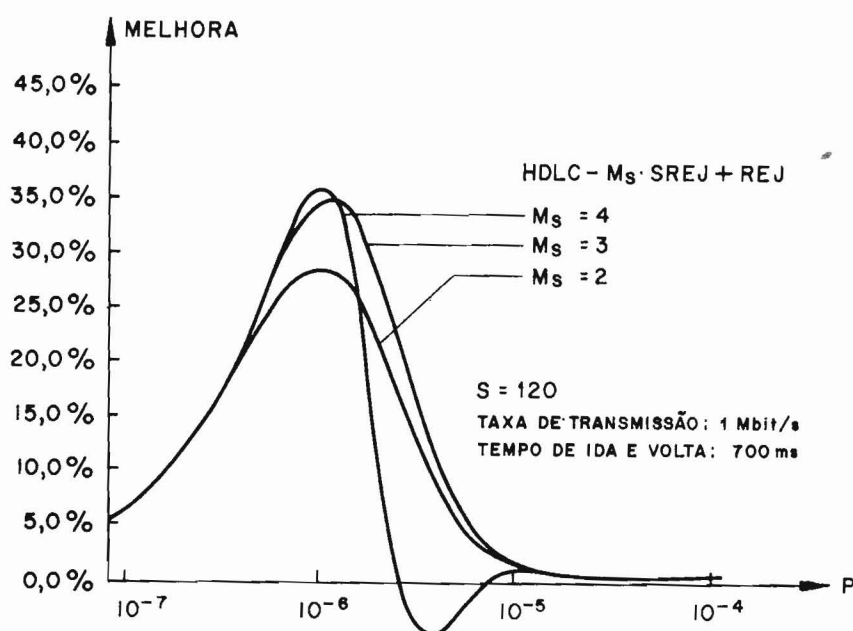


Figura 4. Melhora percentual do protocolo HDLC- M_S SREJ+REJ relativamente ao protocolo HDLC-REJ em função da taxa de erro de bits.

5. Conclusões

Neste artigo, apresentou-se e analisou-se o desempenho de um esquema de recuperação de erros com decisão de pedido de retransmissão seletiva ou contínua baseada na condição de transbordo iminente de memória. A estratégia proposta é totalmente compatível com o protocolo HDLC, o que permite o uso de circuitos integrados de comunicação comerciais existentes. Além disso, para implementar esta estratégia basta que o transmissor e o receptor disponham da memória necessária e que se modifique a lógica (em relação ao protocolo HDLC-SREJ+REJ básico) apenas no receptor.

Ao comparar-se esta nova estratégia com os protocolos convencionais, constata-se uma maior eficiência no uso de comunicação (recurso caro), à custa de uma maior capacidade de armazenamento e processamento das estações transceptoras. O rendimento desta estratégia, na região de alto desempenho, se mostra próximo de um limitante superior das estratégias que se servem do reconhecimento acumulativo (característica dos protocolos tipo HDLC).

Os resultados numéricos sugerem que, em uma determinada região de taxa de erro, a ocorrência de quadros-1 errados é tal que, ao detectarem-se certas configurações de quadros-1 errados, é mais vantajoso enviar um pedido de retransmissão contínua (REJ) do que persistir no envio de pedidos de retransmissão seletiva (SREJ), mesmo dispondo-se de mais memória. Esta característica é conseqüência direta do mecanismo de reconhecimento acumulativo que restringe o envio dos pedidos de retransmissão, ao impor que um pedido de retransmissão seletiva de um certo quadro só possa ser enviado se todos os quadros anteriores já tiverem sido recebidos corretamente.

Os resultados obtidos indicam que o protocolo proposto é bastante atraente para o uso em ambientes com transmissão a alta velocidade e elevada taxa de erro.

Referências

- [1] ISO 3309, "Information Processing Systems – Data Communication – High-Level Data Link Control Procedures – Frame Structure", International Standard ISO 3309, 6 pp., 1984.
- [2] ISO 4335, "Information Processing Systems – Data Communication – High-Level Data Link Control Procedures – Consolidation of Elements of Procedures", International Standart ISO 4335, 42 pp., 1984
- [3] ISO 7809, "Information Processing Systems – Data Communication – High-Level Data Link Control Procedures – Consolidation of Classes of Procedures", International Standart ISO 7809, 15 pp., 1984.
- [4] M. C. Easton, "Batch Throughput Efficiency of ADCCP/HDLC/SDLC Selective Repeat Protocols", IEEE Transactions on Communications, vol. COM-28, n.º 2, Fevereiro 1980, pp. 187-195.
- [5] W. Bux, K. Kümmerle e H. L. Truong, "Balanced HDLC Procedures: A Performance Analysis", IEEE Transactions on Communications, vol. COM-28, n.º 11, Novembro 1980, pp.1889-1897.
- [6] O. C. Duarte e H. M. de Lima, "A New Selective Repeat Scheme – Actual Environment Performance Analysis", IEEE International Conference on Communications, Filadélfia, Estados Unidos, Junho 1988, pp. 22.2.1-22.2.6.

- [7] O. C. Duarte e H. M. de Lima, "Uma Nova Estratégia de Recuperação de Erros para Comunicações de Dados Via Satélite", Anais do 5.º Simpósio Brasileiro de Telecomunicações, Campinas, Setembro 1987, pp. 362-368.
- [8] H. M. de Lima, "Transmissões de Dados via Satélite-Análise de Desempenho de Protocolos Ponto-a-Ponto", Tese de Mestrado, Programa de Engenharia Elétrica, COPPE/UFRJ, 204 pp., Março de 1987.



OTTO CARLOS MUNIZ BANDEIRA DUARTE formou-se em Engenharia Eletrônica na UFRJ em 1976 e obteve o grau de Mestre na COPPE/UFRJ em 1981. Obteve o grau de Dr. Ing. pela École Nationale Supérieure des Télécommunications (ENST – Paris) em 1985. Durante o doutoramento trabalhou no Institut National de Recherche en Informatique et Automatique (INRIA) na equipe do Projeto Piloto NADIR que pesquisava novas aplicações teleinformáticas via satélite. Suas áreas de interesse são: avaliação de desempenho; protocolos de comunicação; especificação formal e redes de serviços integrados. É professor adjunto do Departamento de Engenharia Eletrônica da Escola de Engenharia/UFRJ e professor adjunto da COPPE (Coordenação de Programas de Pós-Graduação em Engenharia)/UFRJ.



HELIOMAR MEDEIROS DE LIMA formou-se em Engenharia Eletrônica na UFRJ em 1981, "cum laude", e obteve o grau de Mestre em Engenharia Elétrica na COPPE/UFRJ, em 1987. Atualmente encontra-se em doutoramento no Programa de Engenharia Elétrica da COPPE/UFRJ. Trabalha desde 1987 no Departamento de Projeto, Análise e Programação de Sistemas (DEPRO) do Banco do Brasil, onde é coordenador técnico do projeto da rede de comunicações via satélite do Banco do Brasil (BBSAT). Suas áreas de interesse são: novas aplicações telemáticas via satélite; protocolos adequados ao ambiente das comunicações via satélite; avaliação de desempenho e redes de serviços integrados.