Protocolos Ponto-a-Multiponto com Retransmissões de Múltiplas Cópias Adaptados ao Ambiente de Satélite a Alta Velocidade

Heliomar Medeiros de Lima [1]
Banco do Brasil S. A. - Supro/Sutec - RJ
R. Br. S. Francisco, 177/2° Andar - Rio de Janeiro-RJ
CEP 20560-030 - Fax: +55 21 288.9245

Otto Carlos Muniz Bandeira Duarte
Universidade Federal do Rio de Janeiro
COPPE/EE - Prog. de Eng. Elétrica/Dept. Eletrônica
P.O. Box 68504 CEP 21945-970 - Rio de Janeiro - RJ - Brasil
Fax: +55 21 290.6626 Email: otto@coe.ufrj.br

Resumo

Este artigo propõe e analisa o desempenho de três protocolos ponto-a-multiponto que provêem uma transferência de dados confiável em ambientes de satélite a alta velocidade. As estratégias de recuperação de erros se servem de mecanismos de retransmissões continuamente repetidas e dotam os receptores de memória a fim de obter uma alta eficiência mesmo em condições bastante desfavoráveis em relação a taxa de erro. O primeiro protocolo proposto é uma extensão do protocolo proposto por Morris para ambientes ponto-a-multiponto. Os outros dois protocolos alteram o procedimento de recuperação de erros de forma a melhorar seus rendimentos. A segunda proposta se serve também de uma retransmissão contínua e a terceira emprega a técnica de retransmissões de m ($m \geq 1$) cópias da mensagem enviada em avanço e recebida com erro. Os resultados numéricos mostram que os protocolos apresentam um bom desempenho e que as modificações melhoram o rendimento. Os protocolos propostos superam em desempenho vários outros esquemas multidestinatários que possuem os mesmos requesitos de memória.

Abstract

This paper presents and evaluates three point-to-multipoint GB(N) protocols. They accomplish continuously repeated retransmission to overcome noisy channel error condition and provide buffer at receivers, aiming at improving their throughput efficiencies. The first scheme is a point-to-multipoint version of the single destination Morris's GB(N). The other schemes result from slight modifications in the retransmission procedure. In the second, after the constinuously repeated retransmission, the transmitter accomplishes a GB(N) retransmission beginning with first message sent in advance and received in error. The third protocol replaces the GB(N) procedure by the retransmission of m ($m \geq 1$) copies of messages sent in advance and received in error. Numerical results show that the proposed modifications significantly improve the throughput efficiency. Moreover, the proposed protocols outperforms many other multidestination GB(N) schemes.

[1] aluno de D. Sc. do Programa de Engenharia Elétrica da COPPE/UFRJ quando da obtenção dos resultados deste trabalho.

1 Introdução

Sistemas de comunicação via satélite possuem a capacidade de difundir informações sobre uma extensa área geográfica de vários milhares de kilômetros e oferecem uma alta taxa de transmissão. Suas características permitem transpor facilmente "obstáculos" naturais tais como: florestas, montanhas e oceanos; oferecem alta conectividade e grande facilidade de expansão da rede. As aplicações que podem se beneficiar destas características incluem a transferência ponto-a-multiponto de grandes arquivos, a disseminação de livros e jornais, a atualização de base de dados distribuídas e a armazenagem de múltiplas cópias (*back-up*) de registros essenciais em locais geograficamente dispersos.

As comunicações via satélite apresentam características diferentes daquelas apresentadas pelas comunicações terrestres convencionais. O longo tempo de propagação (tipicamente $270ms$) e uma tipologia de erros dependente das condições atmosféricas são os maiores inconvenientes dos sistemas via satélite geoestacionário.

Procedimentos de recuperação de erros são empregados para garantir uma alta confiabilidade do sistema de comunicação. Os esquemas de recuperação de erros normalmente empregados são do tipo de recuperação por pedido de retransmissão (*Automatic Repeat Request* - ARQ) por serem simples de implementar, robustos e confiáveis. Estes esquemas têm o inconveniente de requerem um canal de retorno para pedir as retransmissões e introduzem, no mínimo, um atraso igual ao tempo de ida e volta ao satélite. Estes esquemas se classificam em três grandes categorias: pára-e-espera (*stop-and-wait* - SW), retransmisão contínua (*go-back*-N - GB(N)) e retransmissão seletiva (*selective repeat* - SR).

Variações destes três protocolos básicos têm sido propostas para atender às características específicas dos sistemas via satélite. Uma proposta interessante introduzida por Sastry[1] é a retransmissão contínua de várias cópias da mensagem recebida com erro para fazer face a condições bastante adversas em relação a taxa de erros. Morris[2] propôs uma melhora deste esquema ao dotar o receptor de memória para armazenar as mensagens corretamente recebidas apó a detecção de um erro. O protocolo SETRAN[3] também se serve de retransmissões repetidas e memória no receptor porém emprega uma estratégia de retransmissão mais eficiente. Basicamente, o transmissor durante o procedimento de recuperação de erros, ao invés de retransmitir as mensagens já reconhecidas como corretamente recebidas, repete a mensagem mais antiga da sua fila de retransmissão. Miller&Lin[4] propuseram um protocolo de retransmissão seletiva com retransmissões repetidas. Outros esquemas[5]-[7] propõem transmissões repetidas mesmo na primeira transmissão da mensagem. Entretanto, esta estratégia apresenta uma baixa vazão mesmo quando o canal apresenta uma baixa taxa de erros.

Melhores resultados de desempenho são obtidos ao se restringir o número de cópias a serem retransmitidas. Esta técnica foi introduzida por Weldon[8] que propôs um protocolo multifase com retransmissões multicópias. Lima&Duarte[9] combinam este procedimento e a capacidade de memória no receptor a fim de memorizar as mensagens corretamente recebidas depois da deteção de um erro.

Embora a literatura seja bastante extensa em propostas de protocolos ponto-a-ponto, as estratégias ponto-a-multiponto permanecem pouco exploradas. Ainda assim, alguns protocolos ponto-a-multiponto do tipo pára-e-espera[10], retransmissão contínua[11]-[17] e retransmissão seletiva[18, 19] foram propostos. Entre as estratégias que empregam retransmissões repetidas merecem destaque os protocolos de Yao *et al*[15], Chandran&Lin[18] e Towsley&Mithal[19] que são versões ponto-a-multiponto das estratégias ponto-a-ponto Bruneel&Moeneclay[7], SETRAN[3] e Weldon[8], respectivamente.

Este trabalho propõe e analisa o desempenho de três protocolos ponto-a-multiponto com com *buffer* de retransmissão finito e recuperação de erros com retransmissões de cópias[20]. Os protocolos propostos são do tipo retransmissão contínua (GB(N)) de forma a não exigir uma alta capacidade de armazenamento das estações e procuram privilegiar as estratégias simples para não sobrecarregar o processamento. Estas duas características são extremamente importantes para comunicações a alta velocidade.

O primeiro protocolo é a versão ponto-a-multiponto do protocolo de Morris. O segundo consiste em uma modificação do procedimento de retransmissão do primeiro. O terceiro é um protocolo multicópias que retransmite m ($m \geq 1$) cópias da mensagem enviada em avanço e recebida com erro.

Primeiramente o ambiente usado para a análise é explicado. Em seguida, as estratégias propostas são descritas. A análise do desempenho das propostas é realizada através da modelagem dos receptores por um processo semi-Markoviano de parâmetro discreto. Os resultados numéricos são apresentados e comparados com outros protocolos ponto-a-multiponto. Finalmente, as conclusões são apresentadas.

2 Ambiente de Comunicação

Ao longo deste trabalho é assumido que o ambiente consiste de um transmissor e M receptores, onde a comunicação entre o transmissor e os receptores se dá através de um canal ponto-a-multiponto. Todos os dados são transmitidos em forma de mensagens de informação de comprimento fixo (L *bits*) cujo tempo de transmissão é definido como a unidade de tempo. Cada mensagem de informação, que tem K *bits* de informação útil, inclui um código de redundância cíclica que permite a cada receptor detectar erros de transmissão e um número de seqüência que identifica de modo único a mensagem e sua posição na seqüência de transmissão.

O transmissor espera receber confirmação de que toda mensagem foi recebida corretamente por todos os M receptores. Enquanto espera essa confirmação as mensagens são armazenadas em uma fila de retransmissão. Através de um canal de retorno separado, considerado livre de erros, os receptores enviam reconhecimentos para o transmissor indicando a correta recepção das mensagens ou solicitando suas retransmissões.

Uma mensagem é dita transferida para um receptor quando ela é recebida corretamente por esse receptor e pode ser imediatamente liberada para o usuário. Isto é, quando todas as mensagens anteriores tenham sido também recebidas corretamente. Além disso, uma mensagem é dita comunicada para o conjunto de receptores, ou simplesmente comunicada, quando ela é transferida para todos os receptores.

O rendimento dos protocolos é definido como a relação entre o número de *bits* comunicados ao conjunto de receptores e o número total de *bits* transmitidos e retransmitidos (inclusive os *bits* de controle). Ela é obtida ao se atribuir estados para o conjunto de receptores segundo às condições do processo de recuperação de erros e modelando o conjunto de receptores por um processo semi-Markoviano de parâmetros discretos, cuja seqüência de estados é: $X(0), X(1), X(2), X(3), \ldots, X(n), X(n+1), \ldots$ onde $X(n), n = 0, 1, 2, \ldots$, é uma variável de estado que indica o estado do conjunto dos receptores depois da recepção da n-ésima mensagem.

São adotadas as seguintes premissas. A probabilidade de uma mensagem de informação ser recebida com pelo menos um *bit* errado por um dado receptor, denotada por P_{be}, e a probabilidade de uma mensagem de informação ser recebida sem erros por um dado receptor, denotada por $P_{bc} = 1 - P_{be}$, são independentes de mensagem para mensagem e de receptor para receptor. O tempo de ida e volta, definido como o tempo entre a transmissão de uma mensagem e a recepção de seu reconhecimento, é constante e igual a S para todos os receptores. Tem sempre uma mensagem esperando para ser transmitida e o tempo de processamento no transmissor e nos receptores é desprezível.

3 Descrição e Análise dos Protocolos

Os protocolos propostos diferem na estratégia de retransmissão empregada. Eles provêem uma memória tampão com capacidade para $S+1$ mensagens em cada um dos receptores, que se destina a armazenar as mensagens fora de seqüência recebidas corretamente após a detecção de uma ou várias mensagens erradas. Portanto, cada receptor ao detectar uma mensagem errada envia um pedido de retransmissão e passa a processar as enviadas em avanço, armazenando aquelas recebidas corretamente e reservando espaço na sua memória (*buffers*) para aquelas recebidas com erro. As mensagens correspondentes aos espaços deixados na memória dos receptores são chamadas mensagens $B_{e_i}, 0 \leq i \leq S$. A numeração destas mensagens B_{e_i} é feita considerando-se o conjunto de receptores. Isto é, a mensagem B_{e_1} pode corresponder a um espaço deixado na memória do receptor j enquanto que a mensagem B_{e_2} pode corresponder a um espaço deixado na memória do receptor k. Portanto, após o envio do pedido de retransmissão da mensagem B_{e_0}, a primeira mensagem, entre aquelas enviadas em avanço, recebida com erro por pelo menos um receptor é chamada mensagem B_{e_1}. A segunda recebida com erro é chamada de mensagem B_{e_2}, independentemente do receptor que não a recebeu corretamente. E assim sucessivamente.

O Protocolo RC

A estratégia do Protocolo GB(N) com Retransmissões Continuamente Repetidas (protocolo RC) é uma versão ponto-a-multiponto do protocolo de Morris[2]. Ao detectar uma mensagem errada, cada receptor envia um pedido de retransmissão (REJ B_{e_i}) e passa a processar aquelas enviadas em avanço, armazenando aquelas recebidas corretamente e reservando espaço na sua memória para aquelas recebidas com erro. Ao receber um REJ B_{e_0}, o transmissor repete continuamente a mensagem B_{e_0} até receber o seu reconhecimento positivo de todos os receptores. Após a recuperação da mensagem B_{e_0}, o transmissor repete continuamente a mensagem B_{e_1}, se ela existe, até se assegurar que a mesma foi recebida corretamente por todos os receptores. E assim sucessivamente, o transmissor repete continuamente cada uma das mensagens $B_{e_i}, 0 \leq i \leq S$. Após recuperar todas as mensagens B_{e_i}, ele passa a transmitir mensagens novas (ainda não transmitidas).

Este protocolo define dois estados para o conjunto de receptores (estados normal e excepcional), definidos de acordo com comportamento do próprio conjunto de receptores. A Fig. 1 ilustra o diagrama de estados que modela o comportamento do conjunto de receptores.

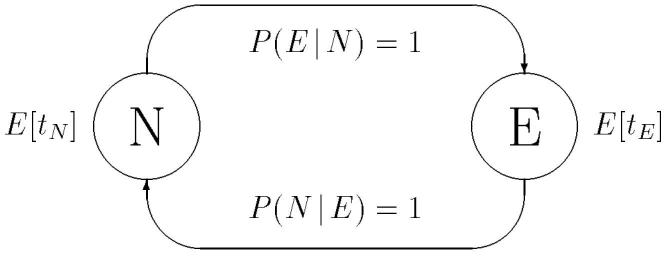

Figura 1: Processo semi-Markoviano que modela o Protocolo RC.

No estado normal não existe nenhum procedimento de recuperação de erros em andamento (as eventuais mensagens anteriormente recebidas com erro já foram recuperadas) e não existem mensagens armazenadas na memória tampão de nenhum receptor: as mensagens são recebidas em seqüência por todos os receptores e prontamente liberadas para os usuários

No estado excepcional, ou existe um pedido de recuperação em andamento ou existe alguma mensagem armazenada na memória de algum receptor dependendo da recuperação de uma mensagem anterior para poder ser liberada para o usuário.

O conjunto de receptores passa do estado normal para o excepcional após pelo menos um dos receptores receber uma mensagem com erro, a mensagem B_{e_0}. A transição de volta para o estado normal só ocorre após a recuperação de todas as mensagens enviadas em avanço e recebidas com erro (mensagens B_{e_i}). A Fig. 2 mostra o funcionamento da estratégia.

O rendimento do protocolo é dado pela média ponderada de seu rendimento em cada um dos estados, onde os pesos são as probabilidades do conjunto de receptores estar em cada um desses estados. Logo,

$$\eta = \left(P(N)\eta_N + P(E)\frac{K}{L}\frac{A+1}{E[t_E]} \right), \tag{1}$$

onde $P(N)$ e $P(E)$ são as probabilidades do conjunto de receptores estar nos estados normal e excepcional, respectivamente, η_N é o rendimento do protocolo no estado normal, A é o número médio de mensagens enviadas em avanço e liberadas para os usuários durante o estado excepcional e $E[t_E]$ é o tempo médio de permanência neste estado.

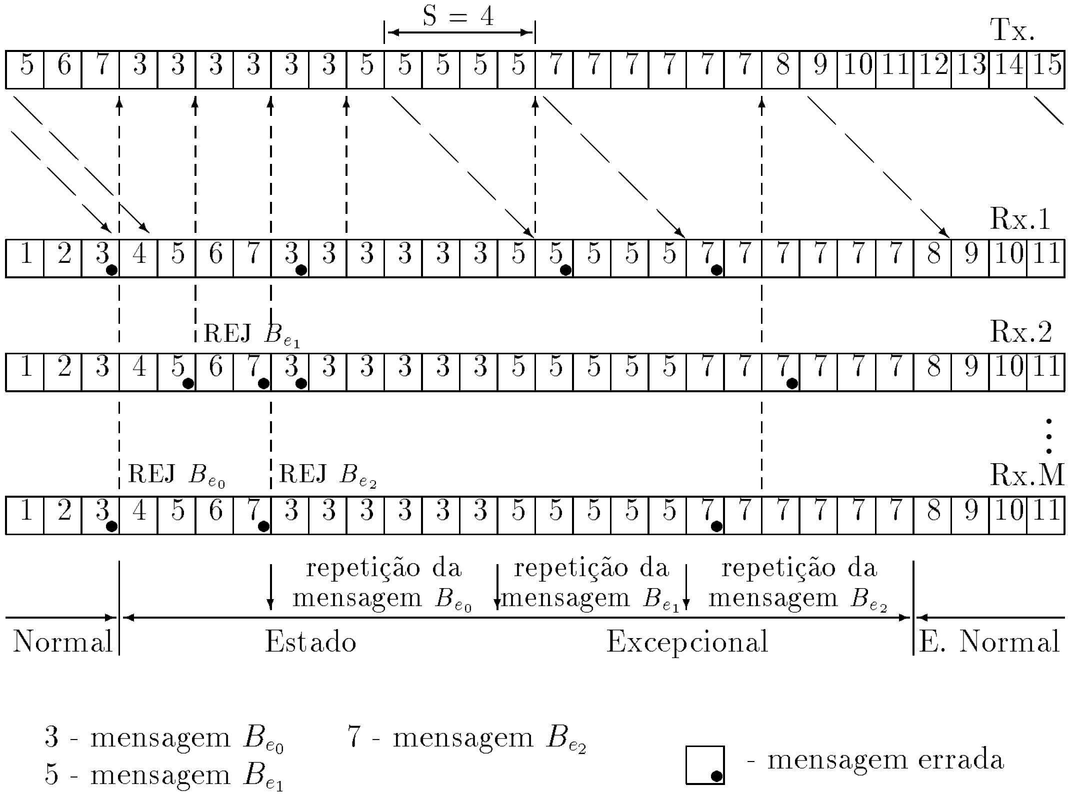

Figura 2: O Protocolo RC ponto-a-multiponto.

O tempo médio de permanência no estado normal, é dado por:

$$E[t_N] = \sum_{i=0}^{\infty} i(1 - P_{bc}^M)(P_{bc}^M)^{i-1} = \frac{1}{1 - P_{bc}^M} \; . \tag{2}$$

Como o conjunto de receptores passa do estado normal para o estado excepcional após a recepção da primeira mensagem errada, apenas uma mensagem com erros é recebida durante este estado. Assim, tem-se:

$$\eta_N = \frac{K}{L}\frac{E[t_N] - 1}{E[t_N]} = \frac{K}{L} P_{bc}^M . \tag{3}$$

Além disso, o conjunto de receptores só volta ao estado normal após liberar para os usuários todas as mensagens enviadas em avanço (mensagens com número de seqüência entre $B_{e_0} + 1$ e $B_{e_0} + S$), tem-se:

$$A = S. \tag{4}$$

Como não há transições virtuais de um estado para ele mesmo (todas as transições são de um estado para o outro), as probabilidades condicionais de transição são dadas por:

$$P(E \mid N) = P(N \mid E) = 1. \tag{5}$$

Usando a equação (5) e aplicando-se as propriedades do processo semi-markoviano de parâmetro discreto, as probabilidades do conjunto de receptores estar nos estados normal e excepcional são dadas respectivamente por:

$$P(N) = \frac{E[t_N]}{E[t_N] + E[t_E]} \tag{6}$$

e

$$P(E) = \frac{E[t_E]}{E[t_N] + E[t_E]}. \tag{7}$$

Substituindo-se as equações (3), (4), (6), (7) e (2) na equação (1), o rendimento passa a ser dado pela expressão:

$$\eta = \frac{K}{L}\frac{P_{bc}^M + (1 - P_{bc}^M)(S+1)}{1 + (1 - P_{bc}^M)E[t_E]} \; . \tag{8}$$

Por outro lado, o tempo médio de permanência no estado excepcional é dado por:

$$E[t_E] = S + E[n_e](1 + E[n_{B_{e_i}}]), \tag{9}$$

onde $E[n_e]$ é o número médio de retransmissões repetidas necessárias para recuperar uma mensagem B_{e_i} e $E[n_{B_{e_i}}]$ é o número médio de mensagens enviadas em avanço e recebidas com erro por pelo menos um receptor (mensagens $B_{e_i}, i \geq 1$).

O número médio de retransmissões necessárias para recuperar cada mensagem B_{e_i} é dado por:

$$E[n_e] = \sum_{j=1}^{\infty}(S + j)\frac{(1 - P_{be}^{j+1})^M - (1 - P_{be}^j)^M}{1 - P_{bc}^M}. \tag{10}$$

Ao mesmo tempo, o número médio de mensagens $B_{e_i}, 1 \leq i \leq S$ é dado por:

$$E[n_{B_{e_i}}] = \sum_{j=0}^{S} j P_j. \tag{11}$$

onde P_j, a probabilidade de j mensagens serem recebidas com erro entre as S enviadas em avanço, é dada pela seguinte distribuição binomial:

$$P_j = \begin{pmatrix} S \\ j \end{pmatrix} \left(1 - P_{bc}^M\right)^j \left(P_{bc}^M\right)^{S-j} . \tag{12}$$

Logo:

$$E[n_{B_{e_i}}] = \sum_{j=0}^{S} j \begin{pmatrix} S \\ j \end{pmatrix} \left(1 - P_{bc}^M\right)^j \left(P_{bc}^M\right)^{S-j} = S(1 - P_{bc}^M). \tag{13}$$

Portanto, substituindo-se as equações (10) e (13) na equação (9) e esta na equação (8), obtém-se o rendimento da estratégia.

O Protocolo RC+GB(N)

O Protocolo GB(N) com Retransmissões Continuamente Repetidas mais retransmissão contínua (protocolo RC+GB(N)) é uma versão ponto-a-multiponto do protocolo ponto-a-ponto proposto por Lima&Duarte[9] e apresenta uma pequena modificação em relação ao procedimento de recuperação de erros do esquema anterior. O transmissor repete continuamente a mensagem B_{e_i} até receber o respectivo reconhecimento positivo de todos os receptores. Entretanto, após recuperar essa mensagem, ao invés de repetir consecutivamente cada uma das mensagens $B_{e_i}, i \geq 1$, o transmissor realiza uma retransmissão GB(N) a partir da primeira mensagem enviada em avanço e recebida com erro (mensagem B_{e_1}). Isto é, retransmite a mensagem B_{e_1} e todas as mensagens com número de seqüência maior do que B_{e_1} armazenadas na sua memória tampão de retransmissão, independentemente delas terem sido recebidas corretamente ou não. Se essa retransmissão não recupera uma mensagem B_{e_i}, esta mensagem torna-se a nova mensagem B_{e_0} e o procedimento acima é repetido. Isto é, novas mensagens B_{e_i} são identificadas entre aquelas enviadas em avanço em relação a essa nova mensagem B_{e_0}, o emissor retransmite continuamente essa nova mensagem B_{e_0} e efetua uma retransmissão GB(N) começando com a nova mensagem B_{e_1}, se ela existir.

Este esquema define três estados para o conjunto de receptores: normal, excepcional e transitório. Além disso, neste caso ocorrem transições virtuais do estado transitório para ele mesmo. O conjunto de receptores volta do estado excepcional para o normal se todas as mensagens enviadas em avanço são recebidas corretamente por todos os receptores ou se todas as mensagens B_{e_i} são recuperadas pela retransmissão GB(N) (que começou com a mensagem B_{e_1}). Caso contrário, se pelo menos uma das mensagens $B_{e_i}, i \geq 1$, não consegue ser recuperada pela retransmissão GB(N), a primeira mensagem B_{e_i} não recuperada torna-se a nova mensagem B_{e_0} e o conjunto de receptores passa para o estado transitório. O estado transitório é similar ao estado excepcional com a diferença de que a mensagem B_{e_0} já terá sido retransmitida uma vez (já terá havido duas tentativas de transmissão dessa mensagem ao invés de apenas uma, como no estado excepcional). Assim, a nova mensagem B_{e_0} será repetida continuamente até que transmissor receba um reconhecimento positivo de todos os receptores. A Fig. 3 mostra o diagrama de estados referente a essa estratégia enquanto que a Fig. 4 mostra o funcionamento do protocolo.

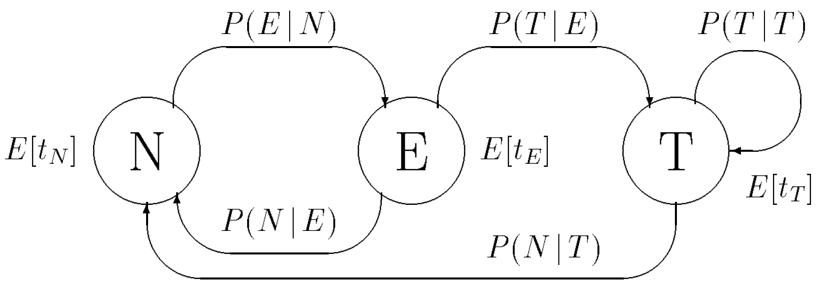

Figura 3: Processo semi-Markoviano que modela o Protocolo RC+GB(N).

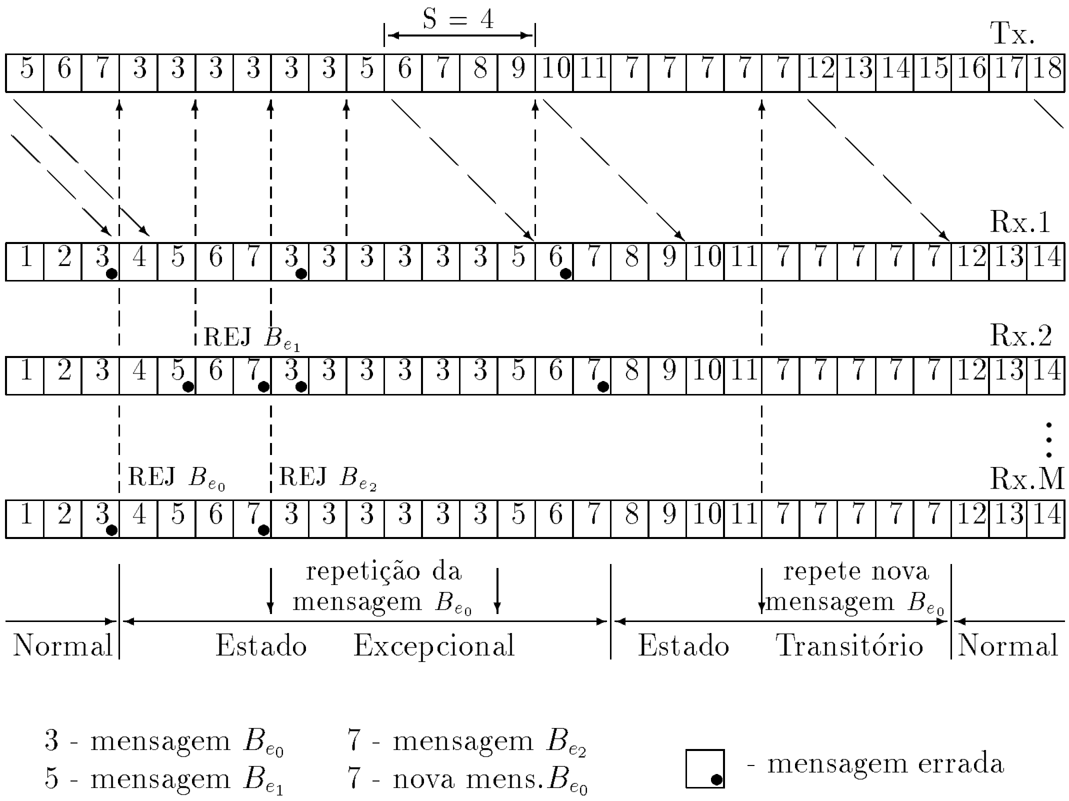

Figura 4: O Protocolo RC+GB(N) Ponto-a-Multiponto.

A probabilidade condicional de transição do estado excepcional para o normal é dada pela soma dos produtos da probabilidade de existir cada mensagem $B_{e_i}, 1 \leq i \leq S$ pela probabilidade delas serem recuperadas na primeira retransmissão:

$$P(N \mid E) = \sum_{i=0}^{S} \begin{pmatrix} S \\ i \end{pmatrix} \left(1 - P_{bc}^{M}\right)^{i} \left(P_{bc}^{M}\right)^{S-i} \left(\frac{(1 - P_{be}^{2})^{M} - P_{bc}^{M}}{1 - P_{bc}^{M}}\right)^{i}. \tag{14}$$

Aplicando-se as propriedades do processo semi-markoviano de parâmetro discreto, as probabilidades do conjunto de receptores estar em cada estado podem ser expressas como:

$$P(N) = \frac{P(N \mid T)E[t_N]}{P(N \mid T)(E[t_N] + E[t_E]) + P(T \mid E)E[t_T]}, \tag{15}$$

$$P(E) = \frac{P(N \mid T)E[t_E]}{P(N \mid T)(E[t_N] + E[t_E]) + P(T \mid E)E[t_T]} \tag{16}$$

e

$$P(T) = \frac{P(T \mid T)E[t_T]}{P(N \mid T)(E[t_N] + E[t_E]) + (1 - P(N \mid E))E[t_T]}. \tag{17}$$

Todas as características do estado normal são iguais ao do protocolo proposto na subseção anterior. Logo, tanto o tempo médio de permanência quanto o rendimento do protocolo neste estado também são dados pelas equações (2) e (3), respectivamente.

O rendimento deste esquema é dado por:

$$\eta = P(N)\frac{K}{L}P_{bc}^{M} + P(E)\frac{K}{L}\frac{A_E+1}{E[t_E]} + P(T)\frac{K}{L}\frac{A_T+1}{E[t_T]}. \tag{18}$$

Então, substituindo-se as equações (3), (2), (15), (16) e (17) na equação (18), o rendimento passa a ser dado pela expressão:

$$\eta = \frac{K}{L}\frac{P(N \mid T)(P_{bc}^{M} + (1-P_{bc}^{M})(A_E+1)) + (1-P_{bc}^{M})P(T \mid E).(A_T+1)}{P(N \mid T)(P_{bc}^{M} + (1-P_{bc}^{M}).E[t_E]) + (1-P_{bc}^{M})P(T \mid E).E[t_T]}\,. \tag{19}$$

As mensagens enviadas em avanço e liberadas para os usuários durante os estados excepcional e transitório só incluem as mensagens corretamente recebidas e armazenadas por todos os receptores se todas as mensagens B_{e_i} anteriores forem recuperadas pela retransmissão GB(N). As mensagens B_{e_i} recuperadas também são incluídas. Com exceção da nova mensagem B_{e_0}, esta análise não leva em conta outras mensagens armazenadas nos *buffers* dos receptores nos momentos de transição para o estado transitório. Logo, tem-se $A = A_E = A_T$ e que $P(N \mid T)$ também é dado pela equação (14). Assim, a expressão para o rendimento torna-se:

$$\eta = \frac{K}{L}\frac{P(N \mid E)P_{bc}^{M} + (1-P_{bc}^{M})(A+1)}{P(N \mid E)(P_{bc}^{M} + (1-P_{bc}^{M}).E[t_E]) + (1-P_{bc}^{M})P(T \mid E).E[t_T]}\,, \tag{20}$$

onde $P(T \mid E) = 1 - P(N \mid E)$.

Ao mesmo tempo, o número médio de mensagens liberadas para o usuário cada vez que o conjunto de receptores passa pelos estados excepcional ou transitório é dado por:

$$\begin{aligned} A &= \sum_{j=0}^{S} N(j)\left(\frac{(1-P_{be}^{2})^{M} - P_{bc}^{M}}{1-P_{bc}^{M}}\right)^{j} + \\ &\quad \sum_{j=1}^{S}\left(\frac{(1-P_{be}^{2})^{M} - P_{bc}^{M}}{1-P_{bc}^{M}}\right)^{j} \sum_{i=j}^{S}\binom{S}{i}\left(1-P_{bc}^{M}\right)^{i}\left(P_{bc}^{M}\right)^{S-i}, \end{aligned} \tag{21}$$

onde $N(i)$, o número médio de mensagens recebidas corretamente em seqüência entre as mensagens B_{e_i} e $B_{e_{i+1}}$, $(0 \leq i \leq S-1)$, é dado por[21]:

$$N_i = \sum_{j=i-1}^{S}\frac{S-j}{j+1}\binom{S}{j}(1-P_{bc}^{M})^{j}(P_{bc}^{M})^{S-j}. \tag{22}$$

Portanto, A pode ser expresso como:

$$A = \frac{P_{bc}^{M} - P_{bc}^{M(S+1)}}{1-P_{bc}^{M}} +$$

$$\sum_{j=1}^{S}\left(\frac{(1-P_{be}^2)^M-P_{bc}^M}{1-P_{bc}^M}\right)^j\sum_{i=j}^{S}\frac{S+i}{j+1}\binom{S}{i}\left(1-P_{bc}^M\right)^i\left(P_{bc}^M\right)^{S-i}. \tag{23}$$

O tempo médio de permanência no estado excepcional é dado por:

$$\begin{aligned} E[t_E] &= S+E[n_e]+ \\ &\quad \sum_{j=1}^{S}\left(\frac{(1-P_{be}^2)^M-P_{bc}^M}{1-P_{bc}^M}\right)^j\sum_{i=j}^{S}\frac{S-i}{i+1}\binom{S}{i}\left(1-P_{bc}^M\right)^i\left(P_{bc}^M\right)^{S-i}+ \\ &\quad \sum_{j=1}^{S}\left(\frac{(1-P_{be}^2)^M-P_{bc}^M}{1-P_{bc}^M}\right)^{j-1}\sum_{i=j}^{S}\binom{S}{i}\left(1-P_{bc}^M\right)^i\left(P_{bc}^M\right)^{S-i}. \end{aligned} \tag{24}$$

O penúltimo termo corresponde ao tempo gasto enquanto o conjunto de receptores espera pelas retransmissões das mensagens já armazenadas nas suas memórias tampão e o último, às retransmissões bem sucedidas das mensagens B_{e_i}.

Finalmente, o tempo médio de permanência no estado transitório é dado por:

$$\begin{aligned} E[t_T] &= S+E[n_t]+ \\ &\quad \sum_{j=1}^{S}\left(\frac{(1-P_{be}^2)^M-P_{bc}^M}{1-P_{bc}^M}\right)^j\sum_{i=j}^{S}\frac{S-i}{i+1}\binom{S}{i}\left(1-P_{bc}^M\right)^i\left(P_{bc}^M\right)^{S-i}+ \\ &\quad \sum_{j=1}^{S}\left(\frac{(1-P_{be}^2)^M-P_{bc}^M}{1-P_{bc}^M}\right)^{j-1}\sum_{i=j}^{S}\binom{S}{i}\left(1-P_{bc}^M\right)^i\left(P_{bc}^M\right)^{S-i}, \end{aligned} \tag{25}$$

onde $E[n_t]$, número médio de retransmissões necessárias para recuperar cada mensagem B_{e_i}, é dado por:

$$E[n_t]=\sum_{j=1}^{\infty}(S+j)\frac{(1-P_{be}^{j+2})^M-(1-P_{be}^{j+1})^M}{1-(1-P_{be}^2)^M}. \tag{26}$$

O protocolo RC+m-Cópias

O Protocolo GB(N) com Retransmissões Continuamente Repetidas mais Retransmissões Multicópias (protocolo RC+m-cópias) após repetir continuamente a mensagem B_{e_0}, até se assegurar que a mesma foi recebida corretamente por todos os receptores, o transmissor já terá recebido todos os reconhecimentos positivos ou negativos. Tirando proveito dessa informação, esta estratégia retransmite apenas m cópias ($m \geq 1$) das mensagens reconhecidas negativamente (mensagens B_{e_i}). Após enviar as m cópias de todas essas mensagens, o transmissor passa a enviar mensagens novas, ainda não transmitidas.

De modo similar ao esquema anterior, se as m cópias não conseguem recuperar uma mensagem $B_{e_i}, 1 \leq i \leq S$, esta mensagem torna-se a nova mensagem B_{e_0}, novas mensagens $B_{e_i}, 1 \leq i \leq S$ podem ser detectadas e o emissor repetirá continuamente a nova mensagem B_{e_0} e repete o procedimento acima para as mensagens $B_{e_1}, B_{e_2}, \ldots, B_{e_S}$, se elas existirem. Entretanto, o transmissor só inicia a repetição consecutiva da nova mensagem B_{e_0}, após completar a transmissão da mensagem $B_{e_0} + S$. Isto é, após completar a sua memória tampão de retransmissão com $S+1$ mensagens. Este esquema define também três estados para o conjunto de receptores (normal, excepcional e transitório), de acordo com o procedimento de recuperação de erros em andamento, que são definidos de modo similar ao esquema anterior. A Fig. 5 mostra o funcionamento deste protocolo.

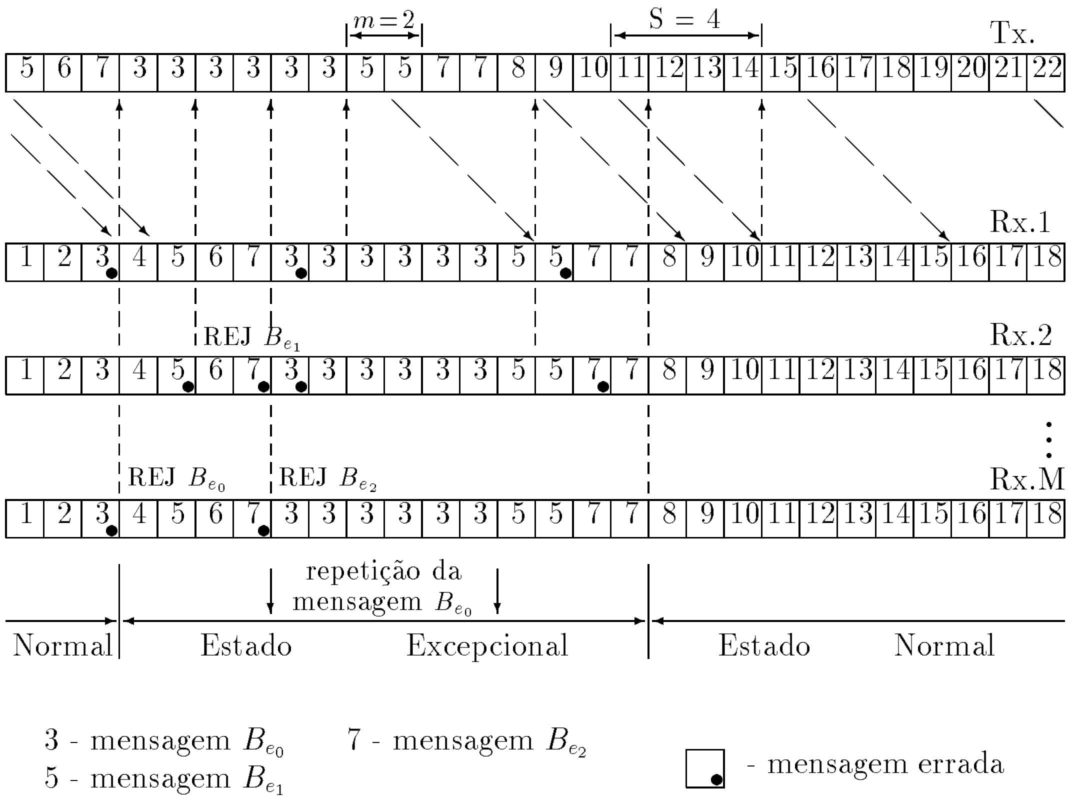

Figura 5: O Protocolo RC+m-Cópias ponto-a-multiponto.

O rendimento também é dado pela equação (20). Entretanto, neste caso a probabilidade de recuperar cada mensagem $B_{e_i}, i \geq 1$ é dada por:

$$q = \frac{(1 - P_{be}^{m+1})^M - P_{bc}^M}{1 - P_{bc}^M} \tag{27}$$

e a probabilidade condicional de transição do estado excepcional para o normal é dada por:

$$P(N \mid E) = \left(\frac{(1 - P_{be}^{m+1})^M - P_{bc}^M}{1 - P_{bc}^M} \right)^i \sum_{i=0}^{S} \binom{S}{i} \left(1 - P_{bc}^M\right)^i \left(P_{bc}^M\right)^{S-i}. \tag{28}$$

A expressão para o número médio de mensagens liberadas para os usuários durante os estados excepcional e transitório é:

$$\begin{aligned} A &= \frac{P_{bc}^{M} - P_{bc}^{M(S+1)}}{1 - P_{bc}^{M}} + \\ & \sum_{j=1}^{S} \left(\frac{(1 - P_{be}^{m+1})^{M} - P_{bc}^{M}}{1 - P_{bc}^{M}} \right)^{j} \sum_{i=j}^{S} \frac{S+i}{j+1} \binom{S}{i} \left(1 - P_{bc}^{M}\right)^{i} \left(P_{bc}^{M}\right)^{S-i}. \end{aligned} \tag{29}$$

Além disso, durante os estados excepcional e transitório as mensagens enviadas em avanço e já armazenadas por todos os receptores não são retransmitidas. Então os tempos médios de permanência nestes estados são dados respectivamente por:

$$E[t_E] = S + E[n_e] + m \sum_{j=1}^{S} \left(\frac{(1 - P_{be}^{m+1})^{M} - P_{bc}^{M}}{1 - P_{bc}^{M}} \right)^{j-1} ! \sum_{i=j}^{S} \binom{S}{i} \left(1 - P_{bc}^{M}\right)^{i} \left(P_{bc}^{M}\right)^{S-i} \tag{30}$$

e

$$\begin{aligned} E[t_T] &= S + E[n_t] + E[n_m] + \\ & m \sum_{j=1}^{S} \left(\frac{(1 - P_{be}^{m+1})^{M} - P_{bc}^{M}}{1 - P_{bc}^{M}} \right)^{j-1} \sum_{i=j}^{S} \binom{S}{i} \left(1 - P_{bc}^{M}\right)^{i} \left(P_{bc}^{M}\right)^{S-i}, \end{aligned} \tag{31}$$

onde $E[n_t]$, o número médio de retransmissões necessárias para recuperar a mensagem B_{e_0}, é dado por:

$$E[n_t] = \sum_{j=1}^{\infty} (S + j) \frac{(1 - P_{be}^{j+m+1})^{M} - (1 - P_{be}^{j+m})^{M}}{1 - (1 - P_{be}^{m+1})^{M}} \tag{32}$$

e $E[n_m]$ é o tempo médio adicional, devido às cópias adicionais, que o transmissor gasta para completar sua memória tampão de retransmissão por ocasião das transições para o estado transitório. Note-se que há uma espera adicional de $m-1$ unidades de tempo para cada mensagem B_{e_i} existente após aquela que se torna a nova mensagem B_{e_0}. Assim, $E[n_m]$ deve levar em conta o número médio de mensagens B_{e_i} existentes após cada nova mensagem B_{e_0}. O número médio de mensagens B_{e_j} após cada mensagem B_{e_k} (isto é, o número médio de mensagens B_{e_j} tal que $j > k$) é dado por:

$$E[n_{B_{e_j}} \,|\, B_{e_j} > B_{e_k}] = \sum_{j=k+1}^{S} (j-k) \binom{S}{j} (1 - P_{bc}^{M})^{j} (P_{bc}^{M})^{S-j}. \tag{33}$$

Portanto, tem-se:

$$\begin{aligned} E[n_m] &= (m-1) \sum_{k=1}^{S} \left\{ \sum_{j=k+1}^{S} (j-k) \binom{S}{j} (1 - P_{bc}^{M})^{j} (P_{bc}^{M})^{S-j} \right. \\ & \left(\frac{(1 - P_{be}^{m+1})^{M} - P_{bc}^{M}}{1 - P_{bc}^{M}} \right)^{k-1} \left(1 - \frac{(1 - P_{be}^{m+1})^{M} - P_{bc}^{M}}{1 - P_{bc}^{M}} \right) \\ & \left. \sum_{i=k}^{S} \binom{S}{i} (1 - P_{bc}^{M})^{i} (P_{bc}^{M})^{S-i} \right\}. \end{aligned} \tag{34}$$

4 Resultados Numéricos

Esta seção apresenta alguns resultados numéricos e compara as estratégias propostas com outras estratégias publicadas na literatura. Para uma comunicação via satélite a 10 Mbps com mensagens de 6800 *bits* ($L = 6800$ e $S = 1024$) e considerando dez ($M = 10$) receptores, a Fig. 6 compara as três estratégias propostas nesta seção com os protocolos GB(N) (memória total e memória limitada) de Gopal&Jaffe e o *Broadcast* GB(N) de Towsley (com blocos de 512 ($F = S/2$) e 1024 ($F = S$) mensagens).

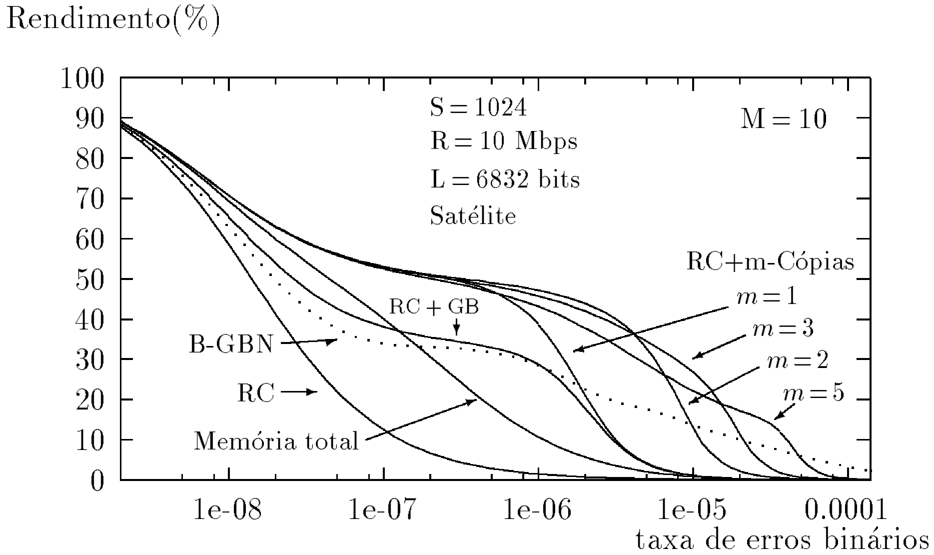

Figura 6: Comparação dos novos protocolos com outros esquemas GB(N) ponto-a-multiponto.

O protocolo RC apresenta praticamente o mesmo rendimento do esquema GB(N) com memória limitada e os dois são superados por todos os outros protocolos para quaisquer taxas de erros. Observa-se que a estratégia RC+m-cópias supera o GB(N) com memória total para quaisquer taxas de erros e apresenta um melhor rendimento do que o B-GB(N) de Towsley para uma larga faixa de taxas de erros, mesmo este usando o dobro de memória no transmissor. Verifica-se ainda que o RC+m-Cópias apresenta uma envoltória de rendimento ótimo que indica o melhor valor de m para cada taxa de erros.

Objetivando observar melhor o efeito da repetição consecutiva de uma mesma mensagem, a Fig. 7 compara os três protocolos propostos com os dois GB(N) de Gopal&Jaffe considerando uma comunicação com um valor baixo para S ($S = 10$). Observa-se entre o RC e o GB(N) com memória limitada algo similar ao que ocorre no caso ponto-a-ponto entre o protocolo de Morris e o GB(N) convencional: para grandes valores de S a diferença é praticamente imperceptível enquanto que para pequenos valores de S o esquema que previlegia as transmissões repetidas apresenta um melhor rendimento nas altas taxas de erros (com S muito grande esse efeito não é perceptível pois isto ocorre quando os rendimentos são da ordem de $1/S$).

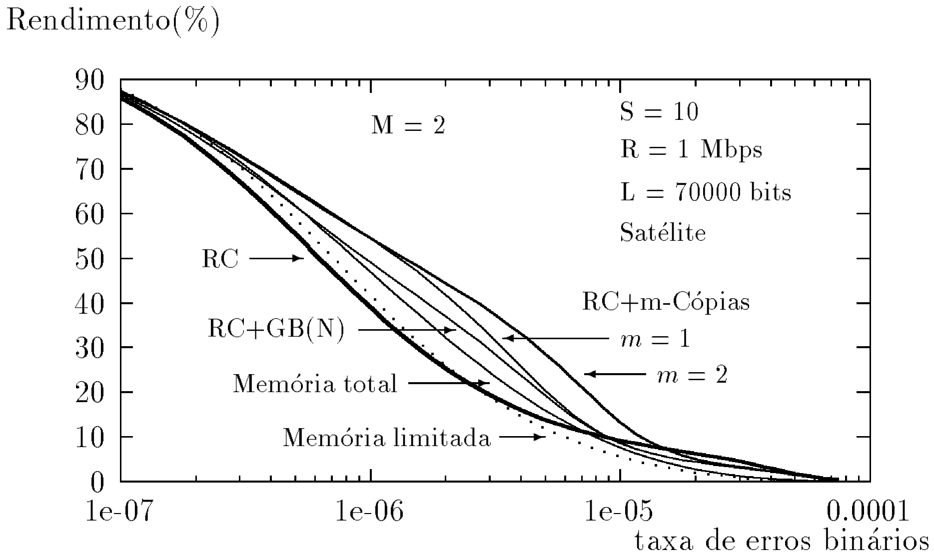

Figura 7: Comparação dos novos protocolos com outros esquemas GB(N) ponto-a-multiponto.

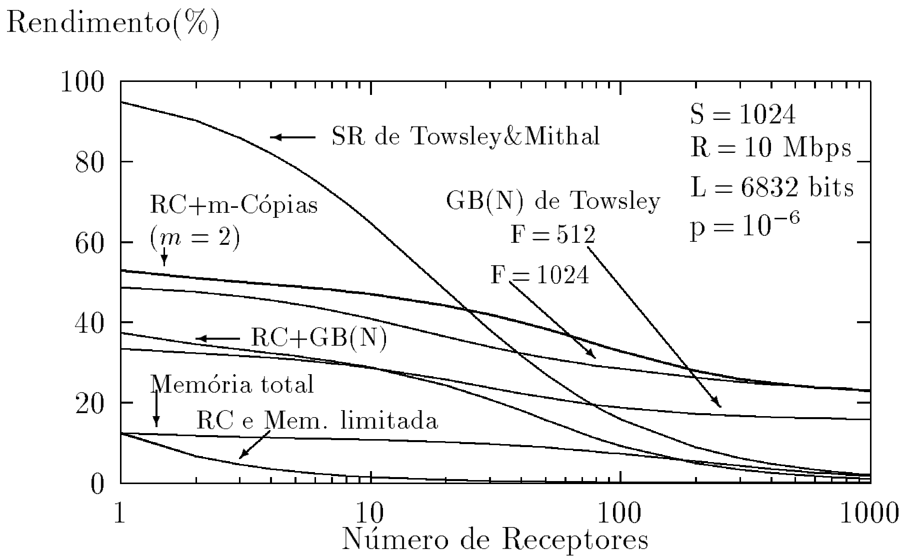

Figura 8: Comparação dos novos protocolos com outros esquemas GB(N) e SR ponto-a-multiponto.

A Fig. 8 compara os rendimentos dos protocolos supramencionados em função do número de receptores, considerando uma comunicação via satélite com taxa de erros de 10^{-6}. Para efeito de comparação, o rendimento do protocolo de retransmissão seletiva de Towsley&Mithal também é incluído. Observa-se que o protocolo RC+m-Cópias supera todos os outros esquemas de retransmissão contínua (GB(N)), qualquer que seja o número de receptores. O resultado mostra também que, quando o número de receptores é maior do que 25, o rendimento da nova estratégia supera inclusive o rendimento do protocolo SR de Towsley&Mithal, que usa o dobro da memória no transmissor.

Finalmente, a Fig. 9 mostra o rendimento da versão monodestinatário do protocolo repetições repetidas mais múltiplas cópias (RC+m-Cópias) supera os rendimentos dos protocolos de Birrel e GB(N) convencional e o limitante inferior do SETRAN.

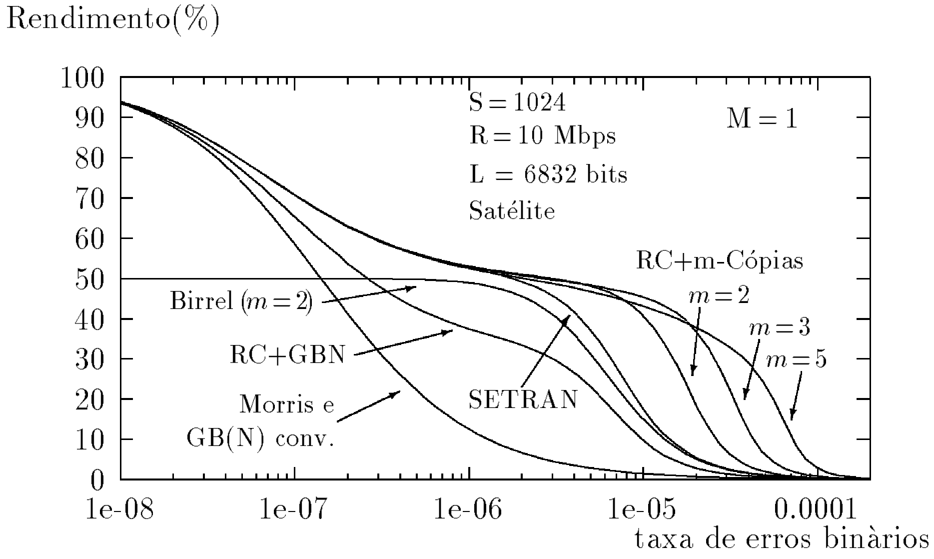

Figura 9: Comparação dos novos protocolos com outros esquemas GB(N) ponto-a-ponto.

5 Conclusão

Este artigo apresentou e analisou três protocolos ponto-a-multiponto com memória finita. Eles empregam a estratégia de retransmissão continuamente repetidas, provêem memória nos receptores, possuem uma memória de retransmissão do mesmo tamanho dos protocolos com retransmissão contínua, são simples de implementar e se adequam bem ao ambiente de satélite a alta velocidade.

Os protocolos não requerem muita memória, evitam transbordo de memória e apresentam bom desempenho mesmo em condições bastante severas de taxas de erros.

Os procedimentos são simples e os protocolos RC e RC+GB(N) permitem o uso de reconhecimento acumulativo que é muito importante para um grande número de receptores.

Os resultados analíticos sugerem o uso de baixos valores de m no protocolo RC+m-cópias e mostram que esta estratégia apresenta um desempenho consideravelmente melhor que outros protocolos ponto-a-multiponto que se servem do mesmo tamanho de memória.

Referências

[1] A. R. K. Sastry, "Improving repeat-request (ARQ) performance on satellite channels under high error rate conditions", *IEEE Transactions on Communications*, vol. COM-23, no. 4, pp. 436–439, abril 1975.

[2] J. M. Morris, "On another Go-Back-N ARQ technique for high error rate conditions", *IEEE Transactions on Communications*, vol. COM-26, no. 1, pp. 187–189, janeiro 1978.

[3] S. Lin e P. S. Yu, "An effective error control scheme for satellite communications", *IEEE Transactions on Communications*, vol. COM-28, no. 3, pp. 395–401, março 1980.

[4] M. J. Miller e S. Lin, "The analysis of some selective repeat ARQ schemes with finite receiver buffer", *IEEE Transactions on Communications*, vol. COM-29, no. 9, pp. 1307–1315, setembro 1981.

[5] N. D. Birrel, "Pre-emptive retransmission for communication over noisy channels", *IEE Proceedings, Part F*, vol. 128, pp. 393–400, novembro 1981.

[6] M. Moeneclaey e H. Brunneel, "Efficient ARQ scheme for high error rate channels", *Electronic Letters*, vol. 20, no. 23, pp. 986–987, novembro 1984.

[7] H. Bruneel e M. Moeneclaey, "On the throughput performance of some continuous ARQ strategies with repeated transmissions", *IEEE Transactions on Communications*, vol. COM-34, no. 3, pp. 244–249, março 1986.

[8] E. Weldon, "An improved selective repeat ARQ strategy", *IEEE Transactions on Communications*, vol. COM-30, no. 3, pp. 480–486, março 1982.

[9] H. M. de Lima e O. C. Duarte, "A Go-Back-N protocol with multicopy retransmission for high speed satellite communications", in *IEEE International Conference on Communications SUPERCOMM/ICC'94*, New Orleans, pp. 859–863, maio 1994.

[10] S. B. Calo e M. C. Easton, "A broadcast protocol for file transfer to multiple sites", *IEEE Transactions on Communications*, vol. COM-29, no. 11, pp. 1701–1707, novembro 1981.

[11] I. S. Gopal e J. M. Jaffe, "Point-to-multipoint communication over broadcast links", *IEEE Transactions on Communications*, vol. COM-32, no. 9, pp. 1034–1044, setembro 1984.

[12] D. Towsley, "An analysis of a point-to-multipoint channel using a go-back-n error control protocol", *IEEE Transactions on Communications*, vol. COM-33, no. 3, pp. 282–288, março 1985.

[13] K. Mase, T. Takenaka, H. Yamamoto e M. Shinohara, "Go-Back-N ARQ schemes for point-to-multipoint satellite communications", *IEEE Transactions on Communications*, vol. COM-31, no. 4, pp. 583–589, abril 1983.

[14] H. M. de Lima e O. C. Duarte, "An improved GB(N) ARQ scheme for point-to-multipoint high speed satellite communications", in *IEEE International Symposium on Circuits and Systems ISCAS'94*, London, pp. 3.241–3.244, maio 1994.

[15] Y. D. Yao e S. X. Cheng, "An ARQ scheme for point-to-multipoint satellite communication systems", in *IEEE International Conference on Communications INFOCOM'87*, San Francisco, pp. 527–532, abril 1987.

[16] H. M. de Lima e O. C. Duarte, "A point-to-multipoint ARQ scheme with multicopy retransmission for high speed satellite communications", in *IEEE International Telecommunication Symposium ITS'94*, Rio de Janeiro, pp. 357–361, agosto 1994.

[17] H. M. de Lima e O. C. Duarte, "An accumulative acknowledgment protocol for point-to-multipoint high speed communications", in *IEEE Global Telecommunications Conference GLOBECOM94*, San Francisco, pp. 181–185, novembro 1994.

[18] S. R. Chandran e S. Lin, "A selective repeat ARQ scheme for point-to-multipoint communications and its throughput analysis", *ACM Computer Communications Review*, vol. 16, no. 3, pp. 292–301, agosto 1986.

[19] D. Towsley e S. Mithal, "A selective repeat ARQ protocol for a point to multipoint channel", in *IEEE International Conference on Communications INFOCOM'87*, San Francisco,CA, pp. 521–526, abril 1987.

[20] H. M. de Lima, *Protocolos Ponto-a-Multiponto de Alto Desempenho.* PhD thesis, Universidade Federal do Rio de Janeiro, PEL/COPPE/UFRJ, 186 p., Rio de Janeiro, março 1994.

[21] H. M. de Lima e O. C. M. B. Duarte, "Comments on "evaluation of the mean error-free interval of a noisy data channel"", *IEEE Transactions on Communications.* to apear.