Um Protocolo SR ARQ Ponto-a-Multiponto com Reconhecimento Acumulativo para Comunicações a Altas Velocidades

Heliomar Medeiros de Lima[1]
Banco do Brasil S.A. - Cedip - RJ
R.Br.S.Francisco, 177/2° Andar
CEP 20560-030 - Rio de Janeiro - RJ
Tel. (021)575.2012

Otto Carlos M. Bandeira Duarte
UFRJ - COPPE/EE - PEE
Fax (021)290.6626 - P.O. Box 68504
CEP 21945-970 - Rio de Janeiro - RJ
e-mail: otto@coe.ufrj.br

Sumário

Este artigo propõe e analisa o desempenho de um protocolo de retransmissão seletiva (SR) ponto-a-multiponto com reconhecimento acumulativo. Ele é simples de implementar e adequado para comunicações a altas velocidades, principalmente em ambientes nos quais a taxa de perdas de mensagens (por erro ou por congestionamento) é muito baixa na maior parte do tempo e elevada apenas durante curtos intervalos de tempo. A estratégia proposta é baseada em três idéias chaves: usar reconhecimento acumulativo para reduzir o *overhead* de processamento e a complexidade de implementação; tirar o máximo proveito da recuperação de erros por retransmissão seletiva (a mensagem REJ é usada apenas quando ocorrem certas combinações de erros) e armazenar as mensagens recebidas corretamente durante procedimentos de recuperação de erros por SREJ ou REJ. A análise de desempenho foi efetuada através de um modelo matemático baseado em processo semi-Markoviano de parâmetro discreto. O novo protocolo apresenta um bom desempenho sob várias condições, sendo, para baixas taxas de perdas de mensagens, mais eficiente do que todos esquemas de retransmissão contínua ponto-a-multiponto conhecidos. Ao mesmo tempo, para altas taxas de erros, seu rendimento é superior ao de outra estratégia de retransmissão seletiva ponto-a-multiponto "não ideal", se aproximando do máximo que um protocolo ARQ pode alcançar.

Abstract

This paper proposes and analyses the performance of a reliable point-to-multipoint selective repeat protocol with accumulative acknowledgment. It is simple to implement and suitable for high speed data communications. The proposed strategy is based on three key ideas. The first is the use of accumulative acknowledgments in order to reduce the processing overhead and implementation complexity, mainly in the transmitter. The second and third aim at improving the throughput efficiency: to make the most of the selective repeat recovery procedure and to process and store all messages correctly received during an exception condition, even after error detections. The proposed strategy performs very well under a wide range of conditions, being more efficient than all known point-to-multipoint GB(N) strategies, for low bit error rates. At the same time, it proves to perform well for high bit error rates.

[1]Doutorando em Engenharia Elétrica, na COPPE/UFRJ - e-mail heliomar@coe.ufrj.br

1 Introdução

Recentes avanços nas tecnologias de transmissão de dados e VLSI (*Very Large Scale Integrated Circuit*) tornam possíveis sistemas de comunicação com taxas de transmissão que são dezenas de vezes superiores às dos sistemas atuais. Estas tecnologias têm sido usadas para reduzir o custo de transmissão em redes de longas distâncias a altas velocidades. Entretanto, em tais sistemas, à medida que a velocidade de transmissão aumenta o *overhead* de processamento nas estações e nós da rede torna-se um gargalo do desempenho. Este problema é particularmente crítico nas comunicações ponto-a-multiponto com um grande número de receptores, devido ao grande número de mensagens de reconhecimento e variáveis de controle a serem processadas pelo transmissor. Para eliminar esse gargalo, mecanismos de sistemas operacionais dedicados e integração VLSI têm sido propostos para implementar protocolos existentes de modo que o tempo de processamento seja minimizado. Outra abordagem compreende o projeto de novos protocolos com mecanismos especificamente concebidos para comunicações a altas velocidades, incluindo procedimentos simples de recuperação de erros e baixa carga de processamento [1].

Sistemas de comunicação ponto-a-multiponto, nos quais uma única transmissão de uma estação emissora pode ser recebida simultaneamente por várias estações destinatárias, permite economia de canais de redes de comunicação quando estes são utilizados para transportar a mesma informação para vários locais. Além de serem mais eficientes do que múltiplos canais ponto-a-ponto, os canais ponto-a-multiponto diminuem e tornam mais uniformes os retardos envolvidos na transmissão das mensagens. Por outro lado, a disponibilização de redes de altas velocidades, abre a possibilidade de uma nova gama de aplicações ponto-a-multiponto, tais como sistemas de teleconferência multimídia, difusão de informações, distribuição de documentos e comunicações para sistemas distribuídos.

Novas tecnologias têm permitido reduzir consideravelmente os erros de transmissão. Entretanto, os sistemas de comunicação continuam apresentando erros devido a perdas de mensagem, controle de fluxo/congestão e saturação de recursos (CPU e memória). Controle de erros fim-a-fim ainda é exigido para um grande número de aplicações.

Recuperação por retransmissão (*Automatic-repeat-request - ARQ*) é o método de controle de erros de transmissão mais comumente utilizado em redes de computadores, pois apresenta uma implementação mais simples e um bom desempenho em muitos tipos de canais reais e se adaptam de modo satisfatório a diferentes comportamentos do canal de comunicação. Esquemas ARQ usam códigos detectores de erros destinados a detectar se uma mensagem contém erros. Se a mensagem recebida contém erros, o receptor responde com um reconhecimento positivo (ACK) através de um canal de retorno. Caso contrário, um reconhecimento negativo (NACK) é enviado e a mensagem é retransmitida. Este procedimento continua até que a mensagem seja recebida corretamente. Existem três protocolos ARQ básicos: pára-e-espera (*stop-and-wait-SW*), retransmissão contínua (*go-back-N-GB(N)*) e retransmissão seletiva (*selective-repeat-SR*).

O protocolo pára-e-espera é o mais simples deles e apresenta uma implementação muito simples, mas é inerentemente ineficiente devido ao tempo de "silêncio" enquanto espera receber o reconhecimento de cada mensagem transmitida. Esta ineficiência torna-se drástica em comunicações a altas velocidades, nas quais o tempo de propagação ida e volta é grande comparado com o tempo de transmissão de uma mensagem.

No protocolo de retransmissão contínua, o transmissor envia mensagens continuamente eliminando o tempo de "silêncio" e reduzindo o efeito do tempo de ida e volta no seu rendimento. O transmissor envia até S mensagens novas entre a transmissão de uma mensagem e a recepção de seu reconhecimento. Doravante neste artigo essas mensagens enviadas por antecipação serão chamadas **mensagens enviadas em avanço**. O receptor descarta todas as S mensagens recebidas após a detecção de um erro de transmissão, sem levar em conta se elas foram recebidas corretamente ou não. Por outro lado, quando um reconhecimento negativo é recebido, o transmissor reenvia a mensagem reconhecida negativamente bem como todas as outras S enviadas em avanço. O esquema GB(N) básico torna-se rapidamente ineficiente para altas taxas de perda de mensagens (devido a erros binários ou a perdas por congestão) e/ou longos tempos de ida e volta (grandes S).

No esquema de retransmissão seletiva (SR), a transmissão de mensagens também é contínua. Entretanto, o transmissor retransmite apenas as mensagens reconhecidas negativamente. Assim, o SR é o protocolo ARQ mais eficiente, à custa de uma alta complexidade de implementação que requer extensivos *buffers* (teoricamente infinitos), numeração ilimitada de mensagens e alta capacidade de implementação nas estações. Em comunicações ponto-a-multiponto, além de processar reconhecimentos de vários receptores, o transmissor necessita manter uma variável de controle para cada par receptor-mensagem (na fila de retransmissão) a fim de garantir que toda mensagem seja recebida corretamente por todos os receptores. Além disso, usualmente é requerido que as mensagens sejam reconhecidas individualmente positiva ou negativamente no momento de sua chegada. Assim, o *overhead* de processamento no transmissor aumenta com o número de receptores devido à maior quantidade de reconhecimentos e de variáveis de controle a serem processados.

Alguns protocolos ponto-a-ponto combinando o uso das mensagens SREJ N(R) (pedido de retransmissão seletiva da mensagem com número de seqüência N(R)) e REJ N(R) (pedido de retransmissão contínua começando na mensagem de número N(R)) têm sido propostos na literatura especializada [2-4] . Nestes esquemas, a recuperação de uma mensagem errada pode ser iniciada no receptor pelo envio de uma mensagem SREJ N(R) ou de uma mensagem REJ N(R) Uma **condição de exceção** é estabelecida no receptor quando este envia uma mensagem REJ N(R) ou SREJ N(R). Esta condição é eliminada com a recuperação da mensagem de número N(R). Além de pedir a retransmissão, a mensagem SREJ N(R)/REJ N(R) reconhece positivamente as mensagens de informação com número de seqüência menor ou igual a N(R)-1. Esta característica é conhecida como **reconhecimento acumulativo**. No protocolo SREJ+REJ básico [2], o receptor pára de processar e armazenar as mensagens enviadas em avanço quando um erro é detectado durante uma condição de exceção SREJ. O protocolos SREJ+REJ Estendido [3] processa e armazena, para liberação posterior, todas as mensagens fora de seqüência recebidas corretamente durante uma condição de exceção SREJ e apresenta uma melhora de rendimento nas altas e médias taxas de erros, em relação ao esquema básico.

O reconhecimento acumulativo simplifica a implementação e elimina a necessidade de um reconhecimento para cada mensagem recebida, permitindo o uso de diferentes freqüências de reconhecimento. Esta característica reduz o número de mensagens de reconhecimento e conseqüentemente o *overhead* de processamento. Além disso, nas comunicações ponto-a-multiponto, o reconhecimento acumulativo permite que o transmissor mantenha apenas uma variável de controle por receptor, ao invés de uma variável de controle para cada par receptor-mensagem. Esta simplificação proporciona uma redução adicional de processamento no transmissor. Isto é particularmente útil nas comunicações, onde o transmissor necessita processar e controlar reconhecimentos de vários receptores.

Diversas variações dos protocolos ARQ básicos têm sido propostas e seus desempenhos avaliados, tanto para o caso ponto-a-ponto [5-10] quanto para ambientes ponto-a-multiponto [11-18].

Este artigo apresenta e analisa o desempenho de um protocolo de retransmissão seletiva com reconhecimento acumulativo, chamado SREJ+REJ Estendido multiponto, adequado para comunicações a altas velocidades, principalmente em ambientes nos quais a taxa de erros é muito baixa na maior parte do tempo e alta apenas durante curtos intervalos de tempo. É baseado no protocolo SREJ+REJ Estendido [3]. Sua idéia chave é tirar o máximo proveito da recuperação por SREJ, processar e armazenar as mensagens enviadas em avanço e recebidas corretamente durante uma condição de exceção SREJ/REJ, enquanto houver espaço na memória do receptor, para liberação posterior ao usuário. A estratégia proposta é fácil de implementar, reduz o efeito do tempo de ida e volta e apresenta um desempenho muito bom sob uma variada gama de velocidade de transmissão, taxa de erros, tempos de ida e volta e número de receptores.

A próxima seção apresenta o ambiente considerado e descreve o esquema proposto. O modelo analítico e a análise de desempenho são apresentados na seção 3. Os resultados numéricos são apresentados na seção seguinte e comparados com os de outros esquemas ARQ. Finalmente as conclusões são apresentadas.

2 O Esquema Proposto

O Ambiente

Ao longo deste artigo 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 bites) cujo tempo de transmissão é definido como a unidade de tempo. Cada mensagem de informação, que tem K bites de informação útil, inclui um código de redundância cíclica que permite a cada receptor detectar erros de transmissão e **número de seqüência** que identifica de modo único a mensagem e sua posição na seqüência de transmissão. 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.

A probabilidade de uma mensagem de informação ser recebida com pelo menos um bite errado por um dado receptor é denotada por P_{be} e a probabilidade de uma mensagem de informação ser recebida sem erros por um dado receptor é denotada por $P_{bc} = 1 - P_{be}$. Estas probabilidades são independentes de mensagem para mensagem e de receptor para receptor. Além disso, 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. Adicionalmente, é considerado também que no transmissor sempre há mensagens de informação esperando para serem transmitidas. Finalmente, este artigo adota ainda as seguintes premissas adicionais: existe um *buffer* para $2.S + 1$ mensagens de informação no transmissor e para $S+1$ em cada receptor; todas as mensagens erradas são detectadas; o tempo de processamento no transmissor e receptores é considerado desprezível; as mensagens são identificadas no momento da recepção, mesmo aquelas erradas.

Descrição do Protocolo

A estratégia proposta é um esquema de retransmissão seletiva ponto-a-multiponto com reconhecimento acumulativo adequado para comunicações a altas velocidades em canais caracterizados por uma boa taxa de erros durante a maior parte do tempo e uma taxa de erros elevada apenas ocasionalmente. Este protocolo é baseado no protocolo ponto-a-ponto SREJ+REJ Estendido [3]. Objetivando melhorar a eficiência nas baixas taxas de erros binários, o esquema procura tirar o máximo proveito da recuperação por SREJ. O REJ só é usado quando ocorrem certas combinações de erros. Quando um receptor detecta um erro enquanto não existe nenhuma condição de exceção SREJ/REJ, ele envia uma mensagem SREJ. Caso contrário, se o erro é detectado durante uma condição de exceção, o receptor envia um REJ. Devido ao mecanismo de reconhecimento acumulativo, o receptor só envia esse REJ após receber a retransmissão da mensagem solicitada. A mensagem REJ também é enviada no caso de erro na retransmissão da mensagem de informação solicitada por um SREJ ou REJ.

Além de usar retransmissão seletiva (SREJ) para melhorar a eficiência na região de baixas taxas de erros, cada receptor processa e armazena, para liberação posterior, as mensagens fora de seqüência (entre aquelas enviadas em avanço) recebidas corretamente durante uma condição de exceção SREJ/REJ. Este armazenamento de mensagens melhora o desempenho da estratégia na região de alta taxas de erros, pois evita que um grande número de mensagens recebidas corretamente durante uma condição de exceção SREJ/REJ sejam descartadas, tal como ocorre em [2]. Isto elimina a necessidade das retransmissões das mensagens já armazenadas em um receptor serem recebidas sem erros por esse receptor. Por sua vez, além de permitir a redução do número de mensagens de reconhecimento, a característica acumulativa reduz drasticamente, principalmente em comunicações a altas velocidades, o número de variáveis de estado processadas para cada mensagem de informação transmitida. Isto proporciona uma redução adicional do *overhead* de processamento no transmissor.

O transmissor armazena em um *buffer* de retransmissão, as mensagens enviadas em seqüência até ter a confirmação de que elas (e todas as precedentes) foram recebidas corretamente por todos os receptores. Para assegurar que cada mensagem é recebida corretamente por todos os receptores, o transmissor mantém uma variável de estado $V_i(R)$ para cada receptor, a qual indica o número da última mensagem reconhecida positivamente pelo receptor. Assim, $V_i(R) = N(R)$ indica que o receptor i recebeu corretamente todas as mensagens com número de seqüência menor ou igual a N(R)-1. Além dessas variáveis, o transmissor mantém duas variáveis de estado globais: $VG(S)$ que indica o número da próxima mensagem a ser transmitida e $VG(R) = \min_i\{V_i(R)\}$ que indica a última mensagem reconhecida positivamente por todos os receptores. Assim, $VG(R) = N(R)$ indica que todas as mensagens com número de seqüência menor ou igual a N(R)-1 foram recebidas corretamente por todos os receptores e que, portanto, pode ser removida do *buffer* do transmissor.

Cada receptor é responsável pelo reordenamento das mensagens que são recebidas fora de seqüência e armazenadas em seu *buffer*. Qualquer mensagem fora de seqüência recebida corretamente é armazenada até que todas as precedentes (com menor número de seqüência) tenham sido recebidas sem erros ou recuperadas por retransmissão. Quando uma mensagem é recuperada, todas as mensagens em seqüência são liberadas para o usuário e removidas do *buffer* do receptor. Cada receptor mantém uma variável $VR(R)$ que indica a mensagem mais antiga não liberada para o usuário.

Quando um receptor envia uma mensagem SREJ iniciando uma recuperação de erro por retransmissão seletiva, ele reserva um *slot* em seu *buffer* e continua a receber, processar e reconhecer as mensagens enviadas em avanço. As mensagens recebidas corretamente são armazenadas para liberação posterior enquanto um *slot* é reservado para cada uma das mensagens recebidas com erro. Uma condição de exceção SREJ é estabelecida no receptor do momento em que a mensagem SREJ é enviada até o instante em que a mensagem retransmitida é recebida. Se a retransmissão solicitada por um SREJ ou pelo menos uma das mensagens enviadas em avanço é recebida com erro por um receptor que enviou um SREJ, este envia uma mensagem REJ solicitando uma retransmissão contínua (*go-back-N retransmission*). Em outras palavras, um receptor envia uma mensagem REJ em casos de **erro múltiplo** (mais de uma mensagem recebida com erro e ainda não recuperada em um mesmo receptor) e uma mensagem SREJ ao detectar uma condição de **erro simples**.

Quando um receptor envia um REJ após uma recuperação por SREJ bem sucedida, ele pode receber e armazenar novas mensagens entre aquelas enviadas em avanço bem como reservar *slots* adicionais enquanto espera pela retransmissão solicitada. É definido que uma condição de exceção REJ existe no receptor do momento em que o REJ é enviado até o momento em que as mensagens enviadas em avanço são recuperadas.

Doravante neste trabalho, as mensagens erradas correspondentes aos *slots* reservados na memória dos receptores serão chamadas mensagens B_{e_i} e seus correspondentes pedidos de retransmissão, SREJ B_{e_i} ou REJ B_{e_i}, onde $0 \leq i \leq S$. A numeração das mensagens B_{e_i} leva em conta o conjunto de receptores. Isto é, a mensagem B_{e_1} pode corresponder a um *slot* reservado no receptor j enquanto a mensagem B_{e_2} pode corresponder a um *slot* reservado no receptor k (possivelmente o primeiro *slot* nesse receptor). Portanto, após o envio do primeiro SREJ correspondendo ao SREJ B_{e_0}, a primeira mensagem, entre aquelas enviadas em avanço, recebida com erro por um ou mais receptores será chamada mensagem B_{e_1}, sem levar em conta quais e quantos receptores a receberam com erros. A segunda será chamada mensagem B_{e_2}, e assim por diante.

Em cada receptor pode haver no máximo uma condição de exceção em andamento. Entretanto, é possível haver situações em que diversas mensagens erradas são detectadas pelo conjunto de receptores como um todo, sem que nenhum receptor detecte mais de uma mensagem com erro (isto é, são detectados apenas erros simples). Assim, considerando-se o conjunto de todos os receptores é possível haver diversas recuperações por SREJ em andamento.

Uma mensagem REJ é enviada quando duas ou mais mensagens dentre $S+1$ consecutivas são recebidas com erro pelo mesmo receptor ou quando uma recuperação por SREJ não é bem sucedida. Assim, há dois casos básicos nos quais uma mensagem REJ B_{e_i} é enviada. Primeiro, quando a retransmissão solicitada por um SREJ não é bem sucedida. Se a mensagem em questão é a mensagem B_{e_0}, o REJ B_{e_0} é enviado exatamente $S+1$ unidades de tempo após o envio do SREJ B_{e_0}. Caso contrário, o intervalo entre os envios do SREJ B_{e_0} e do REJ B_{e_i} é maior do que $S+1$ e menor do que $2(S+1)$. No segundo caso básico duas ou mais mensagens entre $S+1$ consecutivas são recebidas com erro pelo mesmo receptor. Neste caso, se os números de seqüência dessas mensagens pertencem ao conjunto $\{B_{e_0}, B_{e_0}+1, \ldots, B_{e_0}+S\}$, o intervalo entre os envios do SREJ B_{e_0} e do REJ B_{e_i} é $S+1$, pois um receptor só pode enviar um REJ após receber a retransmissão solicitada pelo SREJ. Se pelo menos um dos números de seqüência não pertence ao conjunto acima, este intervalo é maior do que $S+1$.

Em ambos os casos básicos, quando o SREJ B_{e_0} é bem sucedido, a mensagem REJ pode corresponder a qualquer mensagem $B_{e_i}, i>0$. Assim, se o SREJ B_{e_0} é bem sucedido, entre o envio do REJ B_{e_i} até a recepção da mensagem B_{e_i}, o conjunto de receptores pode receber retransmissões dessa e de outras mensagens B_{e_i} (solicitadas por SREJ B_{e_i} enviados por outros receptores) bem como receber e processar novas mensagens com número de seqüência maior do que $B_{e_0}+S$. As retransmissões das mensagens B_{e_i} solicitadas por SREJ de outros receptores podem recuperar algumas mensagens B_{e_i} em alguns receptores. Caso essas retransmissões sejam recebidas com erro por um receptor que se encontre em uma condição de exceção REJ são simplesmente descartadas. As novas mensagens com número de seqüência menor ou igual a $B_{e_i}+S$ recebidas corretamente são armazenadas para liberação posterior (se algumas delas forem recebidas com erro, o receptor reserva espaço em seu *buffer*). Ao mesmo tempo, as mensagens com número de seqüência maior do que $B_{e_i}+S$ são descartadas por pelo menos um receptor, devido a transbordo de memória.

Quando a retransmissão da mensagem B_{e_i} (solicitada por um REJ B_{e_i}) é recebida com erro, outro REJ B_{e_i} é enviado. Neste caso, enquanto esperam a nova retransmissão, os receptores processam as retransmissões das mensagens $B_{e_i}+1, B_{e_i}+2, \ldots, B_{e_i}+S$ (retransmitidas após a retransmissão de B_{e_i}) que podem eliminar algumas lacunas existentes em seus *buffers*. A recepção incorreta dessas retransmissões causam pedido de retransmissão apenas nos receptores nos quais o número de seqüência da mensagem é igual ao valor contido na variável $VR(R)$. Por outro lado, se a retransmissão da mensagem B_{e_i} é bem sucedida e a retransmissão de uma mensagem $B_{e_k}, k>i$ é recebida com erro, um REJ B_{e_k} é enviado solicitando uma retransmissão contínua começando com a mensagem B_{e_k}. Este REJ B_{e_k} é enviado pelos receptores que não tenham ainda recuperado esta mensagem B_{e_k}.

Define-se neste trabalho que uma recuperação REJ está em andamento no transmissor durante as primeiras $S+1$ unidades de tempo após o início da retransmissão solicitada pelo REJ. O transmissor não leva em conta pedidos de retransmissão recebidos enquanto existe uma recuperação REJ em andamento. Entretanto, o número B_{e_i} contido nas mensagens de controle (REJ, SREJ e RR) serão utilizados apenas para atualização das variáveis $V_j(R)$. O procedimento de recuperação de erros é escolhido de acordo com os reconhecimentos recebidos dos receptores enquanto não há nenhuma recuperação REJ em andamento. Se recebe pelo menos um SREJ B_{e_i} e nenhum REJ B_{e_i}, o transmissor retransmite a mensagem B_{e_i}. Se junto com a(s) mensagem(ns) SREJ B_{e_i}, o transmissor recebe pelo menos uma mensagem REJ B_{e_i}, a retransmissão contínua é selecionada.

3 Análise de Desempenho

Modelo Analítico

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 do protocolo, definido como a relação entre o número bites de informação comunicados para o conjunto de receptores e o número total bites transmitidos e retransmitidos (incluindo os bites de redundância), será obtido associando-se estados para o conjunto de receptores de acordo com as condições de exceção existentes em cada um dos receptores e computando, para cada estado, o rendimento da estratégia e a probabilidade do conjunto de receptores estar nesse estado. O rendimento final do protocolo é dado pela média ponderada dos rendimentos em cada estado, onde os pesos são as probabilidades calculadas. Estas probabilidades dependem da probabilidade condicional de transição de um estado para outro e do tempo de espera em cada um desses estados. A fim de determinar a probabilidade do conjunto de receptores estar em cada estado, o seu comportamento é modelado como um processo semi-markoviano de parâmetro discreto onde a variável aleatória $X(n), n = 0, 1, 2, \ldots$, denota o estado do conjunto de receptores após a recepção da **n-ésima** mensagem.

Análise do Rendimento (Eficiência de Vazão)

A estratégia proposta define três estados: estados normal, excepcional e transitório. No estado normal não há nenhuma condição de exceção nos receptores (nenhum receptor está em condição de exceção) e não há nenhuma mensagem armazenada nos *buffers* dos receptores. Os receptores aceitam as mensagens recebidas corretamente em seqüência e podem liberá-las imediatamente para os seus usuários.

O conjunto de receptores é dito no estado excepcional quando uma condição de exceção SREJ existe em pelo menos um dos receptores e não existe condição de exceção REJ em nenhum receptor. Há pelo menos um receptor esperando a recuperação de uma mensagem com número de seqüência entre B_{e_0} e $B_{e_0} + S$. O conjunto de receptores passa do estado normal para o excepcional quando um ou mais receptores detectam uma mensagem errada (a mensagem B_{e_0}) e envia uma mensagem SREJ B_{e_0} solicitando uma retransmissão seletiva. É definido que a transição ocorre no início da recepção dessa mensagem. O conjunto de receptores continua neste estado até recuperar todas mensagens B_{e_i} usando apenas retransmissão seletiva (quando ocorre uma transição de volta para o estado normal) ou até um receptor enviar uma mensagem REJ. Note-se que para haver transição do estado excepcional para o normal nenhum receptor pode detectar mais de uma mensagem errada entre aquelas enviadas em avanço e todas as recuperações por SREJ necessitam ser bem sucedidas.

Por outro lado, uma transição do estado excepcional para o transitório ocorre se uma recuperação SREJ B_{e_i} não é bem sucedida ou se pelo menos um receptor detecta uma condição de erro múltiplo durante a recuperação por SREJ (duas ou mais mensagens recebidas com erro, incluindo a mensagem B_{e_0}). A transição ocorre quando um receptor envia uma mensagem REJ B_{e_i}.

O estado transitório é classificado em ciclos: um **ciclo de transmissão** e um ou mais **ciclos de retransmissão**. O ciclo de transmissão corresponde ao intervalo de tempo entre o envio do REJ B_{e_i} e a recepção da primeira retransmissão da mensagem B_{e_i}. Se a recuperação SREJ B_{e_0} não é bem sucedida, durante o ciclo de transmissão o conjunto de receptores recebe mensagens que serão descartadas devido a transbordo de memória e/ou retransmissões de mensagens B_{e_j} solicitadas por mensagens SREJ B_{e_j} previamente enviadas. Por outro lado, se a recuperação SREJ B_{e_0} tiver sido bem sucedida, o conjunto de receptores pode armazenar novas mensagens recebidas corretamente durante este ciclo, pois a recuperação da mensagem B_{e_0} libera espaços nos *buffers* dos receptores (correspondentes às mensagens com número de seqüência entre B_{e_0} e B_{e_1}). Neste caso, novas mensagens B_{e_i} podem ser identificadas.

O número ciclos de retransmissão corresponde ao número de retransmissões contínuas necessárias para recuperar tanto as mensagens erradas não recuperadas por SREJ quanto novas mensagens B_{e_i} eventualmente identificadas durante o ciclo de transmissão. Logo, o conjunto de receptores só retorna ao estado normal após recuperar todas essas mensagens B_{e_i}. Cada ciclo de retransmissão termina após a recepção da retransmissão da mensagem $B_{e_k}+S$, onde B_{e_k} é o número da primeira mensagem solicitada pela mensagem REJ enviada no início do estado transitório. Durante o estado de transição, o conjunto de receptores armazena, recupera e/ou libera para o usuário apenas as mensagens correspondentes ao ciclo de transmissão (mensagens com número de seqüência entre B_{e_k} e $B_{e_k} + S$). Assim, durante este estado $S + 1$ mensagens são sempre comunicadas para o conjunto de receptores. Após processar e armazenar as mensagens de número $B_{e_k}, B_{e_k}+1, \ldots, B_{e_k} + S$ (detectadas durante o estado excepcional e o primeiro ciclo do estado transitório), o conjunto de receptores espera pelas retransmissões, solicita novas retransmissões e passa para o estado normal quando todas as mensagens $B_{e_k}, B_{e_{k+1}}, \ldots$ são recuperadas. A Fig. 1 ilustra o comportamento do esquema analisado, seus estados e as transições entre eles.

A análise considera um **sistema inferior** do protocolo descrito na seção precedente. No esquema proposto, quando uma mensagen REJ B_{e_k} é enviada no início do estado transitório, até S mensagens são descartadas pelo receptor que enviou a mensagem REJ, devido a transbordo de memória. Esta condição de transbordo de memória pode não existir em muitos receptores que não detectaram mensagens erradas e que, portanto, podem liberar para seus usuários as mensagens recebidas em seqüência no momento das chegadas. Nesta análise é considerado que as mensagens com número de seqüência maior do que $B_{e_k} + S$ são descartadas por todos os receptores. Adicionalmente, no esquema proposto quando a mensagem B_{e_k} é recuperada e ainda permanecem uma ou mais mensagens

$B_{e_j}, j > k$ não recuperadas, o conjunto de receptores envia uma mensagem REJ B_{e_j} solicitando uma retransmissão contínua começando com a mensagem B_{e_j}, libera para seus usuários as mensagens em seqüência armazenadas em seus *buffers* e pode armazenar novas mensagens com número de seqüência maior do que $B_{e_k}+S$ e menor ou igual $B_{e_j}+S$. Nesta análise se a mensagem B_{e_k} é recuperada em um ciclo de retransmissão, a correspondente liberação de espaço na memória não será levado em conta.

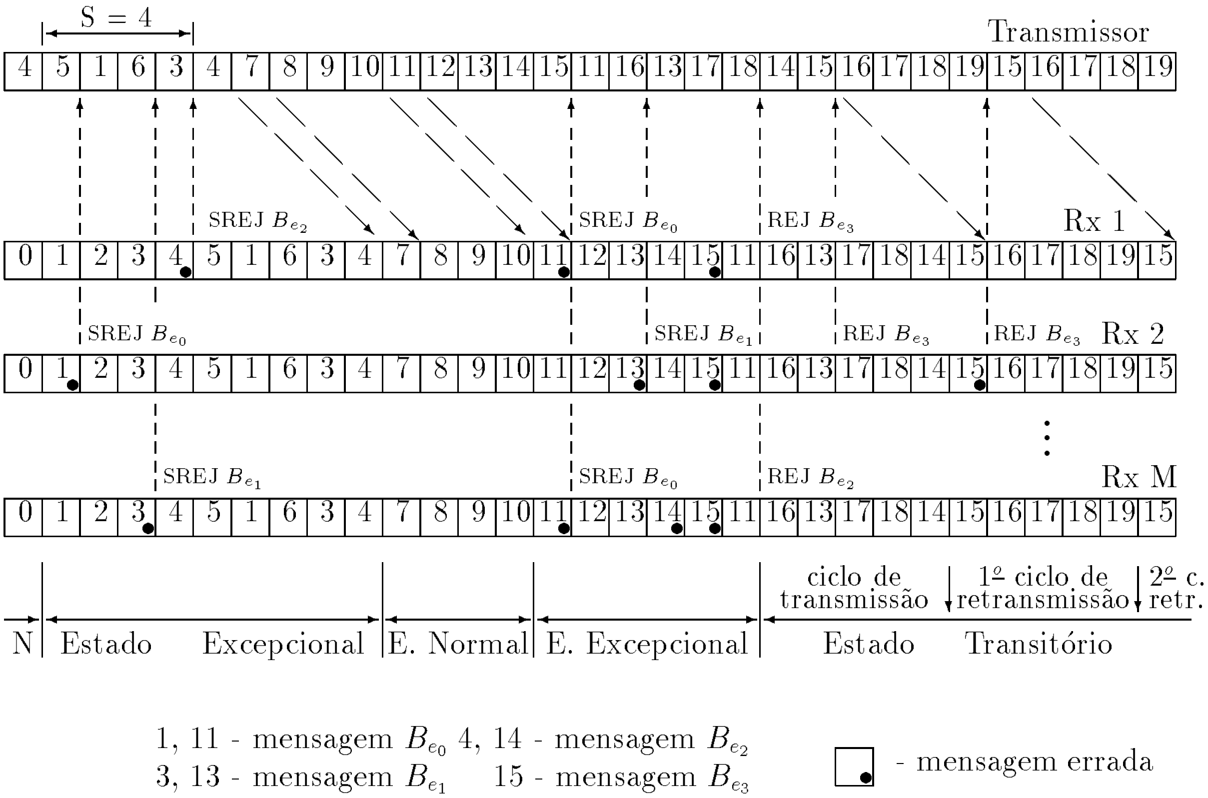

Fig. 1 - A estratégia analisada.

A seguir, será desenvolvida uma expressão para o rendimento do sistema inferior acima mencionado. Como o conjunto de receptores passa do estado normal para o excepcional no início da recepção da mensagem errada, no estado normal os receptores recebem apenas mensagens livres de erros. Logo, o rendimento do protocolo neste estado é K/L.

Além disso, como durante o estado transitório são sempre comunicadas $S+1$ mensagens, o rendimento total do protocolo que é a média ponderada dos rendimentos em cada estado é dado por:

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

onde $P(N), P(E)$ e $P(T)$ são as probabilidades do conjunto de receptores estar nos estados normal, excepcional e transitório, respectivamente. As expressões $(K/L)(A/E[t_E])$ e $(K/L)((S+1)/E[t_T])$ denotam os rendimentos nos estados excepcional e transitório, respectivamente. A é o número médio de mensagens enviadas em avanço e liberadas para os usuários durante o estado excepcional. $E[t_E]$ e $E[t_T]$ são os tempos médios de espera nos estados excepcional e transitório, respectivamente. A Fig. 2 mostra o diagrama de estado que modela a estratégia proposta.

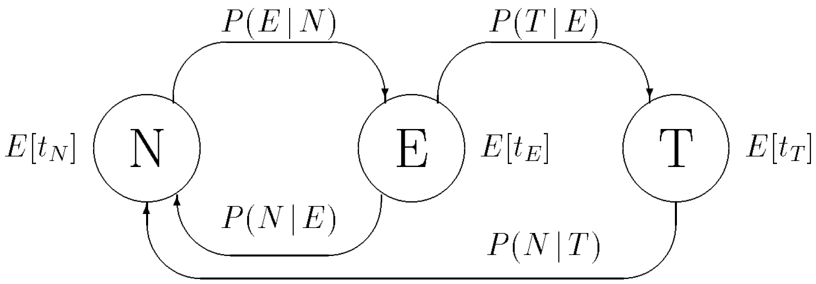

Fig. 2 - Diagrama de transição da estratégia proposta.

O conjunto de receptores sempre passa do estado normal para o excepcional e do estado transitório para o normal. Logo, as duas probabilidades condicionais de transição são:

$$P(E\,|\,N) = P(N\,|\,T) = 1. \tag{2}$$

Usando a equação 2 e aplicando as propriedades do processo semi-Markoviano, $P(N)$, $P(E)$ e $P(T)$ podem ser expressas como:

$$P(N) = \frac{E[t_N]}{E[t_N] + E[t_E] + E[t_T].P(T\,|\,E)}, \tag{3}$$

$$P(E) = \frac{E[t_E]}{E[t_N] + E[t_E] + E[t_T].P(T\,|\,E)} \tag{4}$$

e

$$P(T) = \frac{E[t_T].P(T\,|\,E)}{E[t_N] + E[t_E] + E[t_T].P(T\,|\,E)}, \tag{5}$$

onde $E[t_N]$, $E[t_E]$ e $E[t_T]$ são os tempos médios de espera nos estados normal, excepcional e transitório, respectivamente. $P(T \mid E)$ é a probabilidade condicional de transição do estado excepcional para o transitório ($P(T\,|\,E) = 1 - P(N\,|\,E)$).

Combinando as equações 3, 4 e 5 com a equação 1, o rendimento pode ser dado por:

$$\eta = \frac{K}{L}\frac{E[t_N] + A + (S+1)P(T\,|\,E)}{E[t_N] + E[t_E] + E[t_T].P(T\,|\,E)} \tag{6}$$

O tempo médio de espera no estado normal é:

$$E[t_N] = \sum_{i=0}^{\infty} i.(1 - P_{bc}^M).(P_{bc}^M)^i = \frac{P_{bc}^M}{1 - P_{bc}^M} \tag{7}$$

Substituindo-se este tempo médio de espera (equação 7) na equação 6, a expressão do rendimento, como uma função de $P(T\,|\,E)$, A, $E[t_E]$, $E[t_N]$ e $E[t_T]$, torna-se:

$$\eta = \frac{K}{L}\frac{P_{bc}^{M} + (1-P_{bc}^{M}).(A + P(T\,|\,E)P(T\,|\,E)(S+1))}{P_{bc}^{M} + (1-P_{bc}^{M}).(E[t_E] + E[t_T].P(T\,|\,E))}. \tag{8}$$

As expressões para $P(T\,|\,E)$, A, $E[t_E]$ e $E[t_N]$ são desenvolvidas a seguir. Primeiro será calculada a probabilidade condicional de transição do estado excepcional para o normal. A expressão para a probabilidade condicional de transição do estado excepcional para o transitório será dada pela relação $P(T \mid E) = 1 - P(N \mid E)$. Um dos principais casos de transição do estado excepcional para o normal é aquele no qual a recuperação SREJ B_{e_0} é bem sucedida e todas as mensagens enviadas em avanço são recebidas corretamente por todos os receptores. Este caso ocorre com a seguinte probabilidade:

$$p_e(0) = P_{bc}^{S.M} q_1, \tag{9}$$

onde q_1, a probabilidade de uma recuperação SREJ B_{e_i} ser bem sucedida, é dada por:

$$q_1 = \frac{(1-P_{be}^2)^M - P_{bc}^M}{1-P_{bc}^M}. \tag{10}$$

Os outros casos são aqueles nos quais uma ou mais mensagens enviadas em avanço são recebidas com erro pelo conjunto de receptores $(B_{e_1}, \ldots)$, mas cada receptor detecta no máximo uma mensagem errada (contando com a mensagem B_{e_0}) e todas as mensagens $B_{e_i} (i \geq 0)$ são recuperadas por retransmissões seletivas solicitadas. Em outras palavras, nesses casos cada receptor que detecte erro na mensagem B_{e_i}, $(i \geq 0)$, recebe corretamente todas as outras mensagens $B_{e_j} (j \neq i)$ recebidas com erro por outro(s) receptor(es).

Esta análise leva em conta apenas os casos onde o tempo de espera no estado excepcional não é maior do que $2(S+1)$. Nestes casos o conjunto de receptores detecta $k+1$ mensagens B_{e_i} (incluindo a mensagem B_{e_0}) durante o estado excepcional cujas retransmissões seletivas são bem sucedidas e recebe todas as mensagens com número de seqüência maior do que $B_{e_0} + S$ e menor ou igual a $B_{e_k} + S - k$.

A probabilidade de ocorrer o caso com $k+1$ mensagens B_{ei} é:

$$p_e(k) = (1-P_{bc}^M)^k P_{bc}^{M(S-k)} q_1^{k+1} p_y(k) \sum_{i=k}^{S} \binom{i-1}{k-1} \left(P_{bc}^M\right)^{i-k}, \;\; k = 1, 2, \ldots, S, \tag{11}$$

onde $p_y(k)$ é a probabilidade de cada receptor receber no máximo uma mensagem errada, dado que $B_{e_0}, \ldots, B_{e_k}$ são detectadas pelo conjunto de receptores. $p_y(k)$ é dada por:

$$p_y(k) = \left(\sum_{j_1=1}^{M} \binom{M}{j_1} P_{be}^{j_1} P_{bc}^{M-j_1} \sum_{j_2=1}^{M-nj_1} \binom{M-nj_1}{j_2} P_{be}^{j_2} P_{bc}^{M-j_2} \ldots \right.$$
$$\left. \sum_{j_{k+1}=1}^{M-nj_k} \binom{M-nj_k}{j_{k+1}} P_{be}^{j_{k+1}} P_{bc}^{M-j_{k+1}} \right) \left(1-P_{bc}^M\right)^{-(k+1)}. \tag{12}$$

onde

$$nj_k = j_1 + \ldots + j_k. \tag{13}$$

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

$$P(T \,|\, E) = 1 - P(N \,|\, E) = 1 - \sum_{i=0}^{S} p_e(i) \tag{14}$$

As expressões para o número médio de mensagens comunicadas durante o estado excepcional (A) e o tempo médio de espera neste estado são desenvolvidas a seguir. A consiste de dois termos:

$$A = q_1(A_1 + A_2). \tag{15}$$

O termo A_1 representa o número médio de mensagens com número de seqüência entre B_{e_0} e $B_{e_0} + S$ comunicadas durante o estado excepcional, dado que a recuperação SREJ B_{e_0} é bem sucedida. A_1 é dado por:

$$\begin{aligned}
A_1 \;=\; & \sum_{i=0}^{S} \left(1 + \frac{S-i}{i+1}\right) \binom{S}{i} (1 - P_{bc}^M)^i (P_{bc}^M)^{S-i} + \\
& q_1 P_y(1) \sum_{i=1}^{S} \frac{S+1}{i+1} \binom{S}{i} (1 - P_{bc}^M)^i (P_{bc}^M)^{S-i} + \\
& q_1^2 P_y(2) \sum_{i=2}^{S} \frac{S+1}{i+1} \binom{S}{i} (1 - P_{bc}^M)^i (P_{bc}^M)^{S-i} + \ldots + \\
& q_1^{S-1} P_y(S-1) \sum_{i=S-1}^{S} \frac{S+1}{i+1} \binom{S}{i} (1 - P_{bc}^M)^i (P_{bc}^M)^{S-i} + \\
& q_1^S (1 - P_{bc}^M)^S p_y(S).
\end{aligned} \tag{16}$$

O termo A_2 representa o número médio de mensagens com número de seqüência maior do que $B_{e_0} + S$ comunicadas durante o referido estado, dado que a recuperação SREJ B_{e_0} é bem sucedida. É assumido que no caso de transição do estado excepcional para o transitório, o conjunto de receptores envia a mensagem REJ quando ele recebe a retransmissão da mensagem de informação solicitada pela mensagem SREJ B_{e_0}. A_2 é dado por:

$$A_2 = \sum_{k=1}^{S-1} \left(1 - P_{bc}^M\right)^k \left(P_{bc}^M\right)^{S-k} q_1^k p_y(k) \sum_{i=k+1}^{S} \binom{i-1}{k} \left(P_{bc}^M\right)^{i-k}. \tag{17}$$

Por outro lado, o tempo médio de espera no estado excepcional é

$$E[t_E] = S + 2 + A_2 + E[t_a], \tag{18}$$

onde A_2 é o tempo de espera adicional devido às recepções das mensagens com número de seqüência maior do que $B_{e_0} + S$, que ocorrem após a recepção da retransmissão da mensagem B_{e_0}. $E[t_a]$ é o tempo de espera extra correspondente ao tempo gasto na recepção das retransmissões solicitadas pelas mensagens SREJ B_{e_i}, $i > 0$. $E[t_a]$ é dado por:

$$E[t_a] = \sum_{k=1}^{S} k p_e(k), \tag{19}$$

onde $p_e(k)$ é dado pela equação 11.

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

$$E[t_T] = (1 + E[n_e])(S + 1). \tag{20}$$

onde $E[n_e]$ é número médio de ciclos de retransmissões.

Seja p_0 a probabilidade de uma mensagem ser recebida corretamente por todos os M receptores em uma transmissão. Então:

$$p_0 = P_{bc}^M \tag{21}$$

Seja p_i ,$i = 1, 2, \ldots$, a probabilidade de uma mensagem enviada em avanço ser recebida corretamente por todos os receptores após i ciclos de retransmissões. Não é difícil mostrar que:

$$p_i = (1 - P_{be}^{i+1})^M \tag{22}$$

Seja q_i a probabilidade de uma mensagem B_{ej} ser recuperada por todos os M receptores após i ciclos de retransmissão. Então:

$$q_i = \frac{(1 - P_{be}^{i+1})^M - P_{bc}^M}{1 - P_{bc}^M}. \tag{23}$$

Seja n_i o ciclo de retransmissão no qual as mensagens correspondentes ao ciclo de transmissão são comunicadas para todos os M receptores. Então

$$Pr\{n_i \leq j\} = p_j^S . q_j. \tag{24}$$

A probabilidade de todas as $S+1$ mensagens, correspondentes ao ciclo de transmissão, serem comunicadas para todos os M receptores durante o $j^{\underline{o}}$ ciclo de retransmissão, dado que nem todas haviam sido recuperadas até o ciclo de retransmissão de número $j - 1$ é dada por:

$$Pr\{n_i = j\} = Pr\{n_i \leq j\} - Pr\{n_i \leq j - 1\}. \tag{25}$$

O número médio de ciclos de retransmissão é dado por:

$$E[n_e] = \sum_{j=1}^{\infty} j.Pr\{n_i = j\}. \tag{26}$$

Assim,

$$E[n_e] = \sum_{j=1}^{\infty} j. \left((1 - P_{be}^{j+1})^{M.S}.\frac{(1 - P_{be}^{j+1})^M - P_{bc}^M}{1 - P_{bc}^M} - (1 - P_{be}^{j})^{M.S}.\frac{(1 - P_{be}^{j})^M - P_{bc}^M}{1 - P_{bc}^M} \right). \tag{27}$$

Portanto, substituindo as equações 20, 18, 15 e 14 em 8, obtém-se um **limitante inferior** do rendimento do protocolo proposto.

4 Resultados Numéricos

Esta seção discute os resultados numéricos do esquema proposto e compara-os com outros resultados publicados. O rendimento do esquema proposto e do GB(N) com memória completa (*full memory* GB(N)) de Gopal&Jaffe [11] é mostrado na Fig. 3, para vários números de receptores, $M = 2, 5, 10$ e 20, através de um canal terrestre a uma velocidade de 150 Mbps com mensagens de 6000 bites ($L = 6000$, $T \approx 40ms$ e $S = 1024$). Pode-se observar que, para o mesmo número de receptores, o esquema proposto apresenta um melhor desempenho, principalmente na região de baixas taxas de erros. A retransmissão seletiva SREJ aumenta o rendimento para baixas taxas de erros e o armazenamento nos receptores durante as condições de exceção SREJ/REJ melhora-o nas altas taxas de erros.

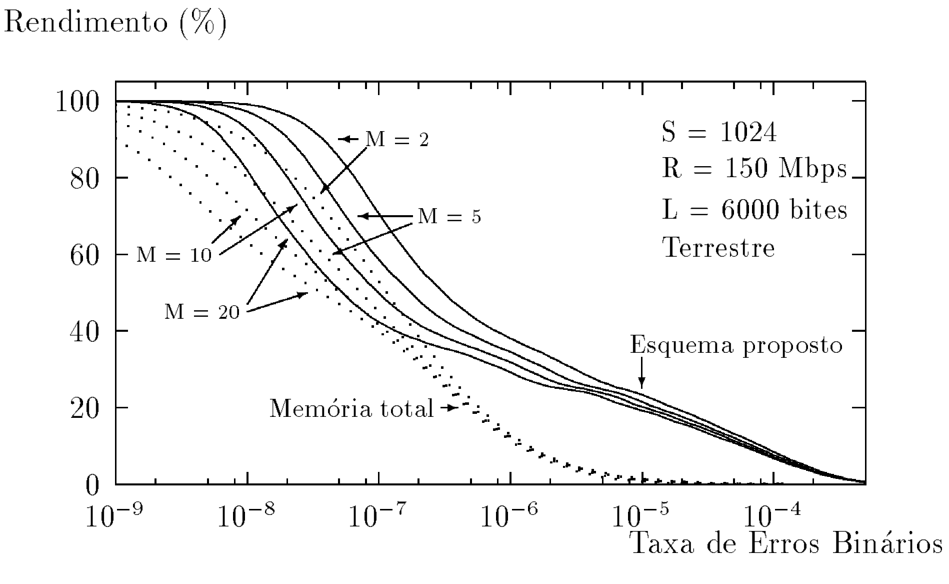

Fig. 3 - Rendimento do esquema proposto e do GB(N) com memória completa

A Fig. 4 compara, para comunicações ponto-a-multiponto a 150 Mbps com $M = 25$, $S = 1024$ e $L = 6000$ bites, o rendimento do esquema proposto e dos seguintes protocolos: SR de Chandran&Lin [13]; SR de Towsley&Mithal [14] com $q = 1$ e retransmissões monocópias ($n_1 = 1$); GB(N) de Towsley [12] com blocos de 1024 mensagens ($F = S = 1024$) e dois GB(N) de Gopal&Jaffe [11] (memória limitada e memória completa). Os esquemas SR de Towsley&Mithal e Chandran&Lin requerem uma mensagem de reconhecimento para cada mensagem de informação recebida e que o transmissor supervisione uma variável de estado para cada par receptor-mensagem, que aumenta o *overhead* de processamento. Este esquemas requerem diferentes capacidades de memória no transmissor: o primeiro uma capacidade para $2S+1$ mensagens e o segundo para $S+1$. Nos esquemas GB(N) de Towsley, o transmissor requer um *buffer* para $2S+1$ mensagens e os receptores, para $S+1$. Além disso, essas estratégias requerem um controle de reconhecimentos no receptor baseado em pares receptor-mensagem. Na região de baixa taxa de erros, o protocolo proposto supera o esquema SR de Chandran&Lin e todos os esquemas GB(N). Pode também ser observado que o esquema proposto supera o SR de Towsley&Mithal para uma larga faixa de altas taxas de erros enquanto que para baixas taxas de erros os dois esquemas apresentam rendimentos praticamente iguais. Na região de altas taxas de erros, o seu rendimento é bastante próximo daquele apresentado pelo esquema SR de Chandran&Lin.

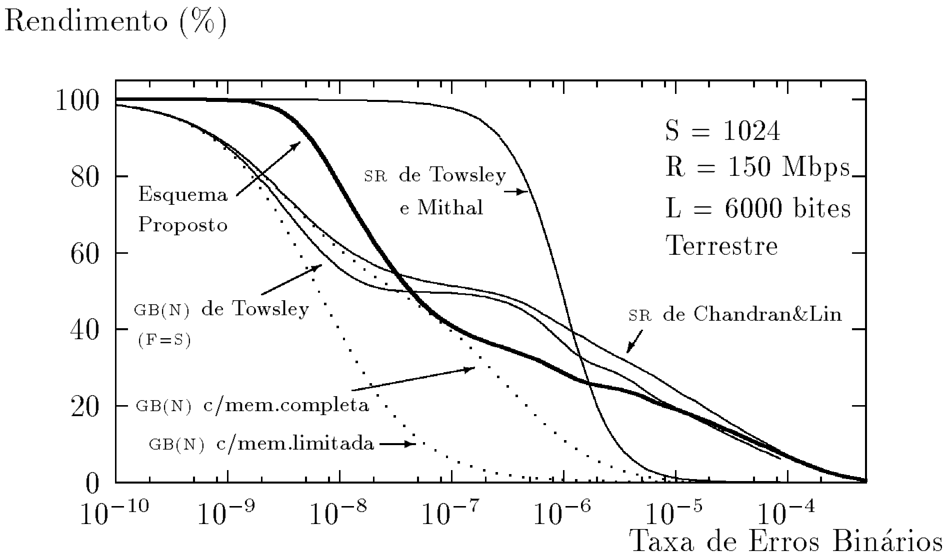

Fig. 4 - Comparação do esquema proposto com dois protocolos SR[13, 14] e três GB(N) [11, 12], para $M = 25$

A Fig. 5 compara o desempenho do esquema proposto, do SR de Towsley e Mithal e do protocolo SR "ideal" com *buffer* infinito, que representa um limite de eficiência de vazão que qualquer protocolo ARQ pode alcançar na prática, para comunicação via satélite a 10 Mbps, com mensagens de 6.000 bites ($L = 6000$) e $S = 1024$. Pode ser visto que, para altas taxas de erros, o esquema proposto apresenta rendimento próximo daquele apresentado pelo protocolo SR ideal.

A Fig. 6 mostra, para comunicações ponto-a-multiponto a 150 Mbps com taxa de erro binária de 10^{-6}, $S = 1024$ e $L = 6000$ bites, o rendimento de vários protocolos, como uma função do número de receptores: o esquema proposto, o SR de Towsley&Mithal, os esquemas GB(N) com memória completa e com memória limitada. Pode ser observado que o esquema proposto é menos sensível ao aumento do número de receptores e tem melhor rendimento do que o GB(N) com memória completa (para qualquer número de receptores) e do que o SR de Towsley&Mithal, para $M > 70$.

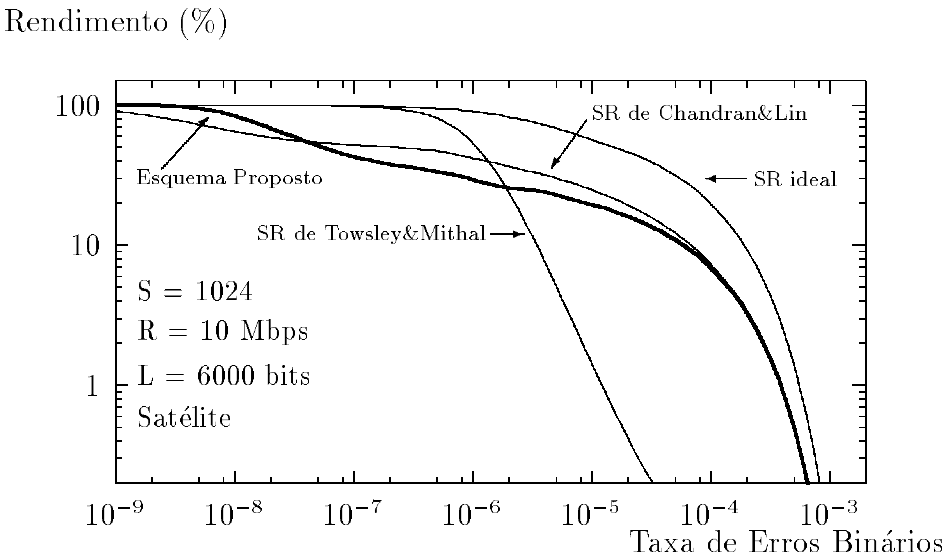

Fig. 5 - Comparação do esquema proposto com dois protocolos SR com memória finita [13, 14] e com o SR "ideal", para $M = 20$

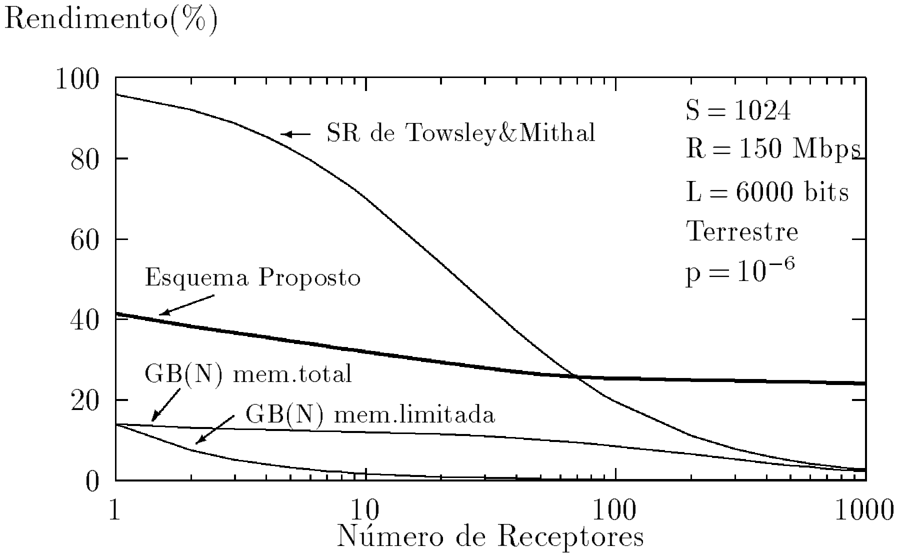

Fig. 6 - Rendimento do esquema proposto e dos protocolos GB(N) de Gopal&Jaffe [11] e SR de Towsley&Mithal [14]

5 Conclusão

Este artigo apresentou e analisou o desempenho de um esquema de retransmissão seletiva com reconhecimento acumulativo para comunicações ponto-a-multiponto a altas velocidades. Ele combina o uso dos procedimentos de recuperação SREJ e REJ e tira o máximo proveito das memórias dos receptores.

A estratégia proposta reduz o efeito do tempo de ida e volta da comunicação, apresenta baixa complexidade de implementação, baixo *overhead* de processamento e um bom desempenho sob condições de altas taxas de erros.

Os resultados analíticos mostram que a estratégia proposta é melhor do que o esquema GB(N) de memória completa de Gopal&Jaffe e, para uma larga faixa de altas taxas de erros e/ou grandes números de receptores, supera o esquema SR ponto-a-multiponto com memória finita de Towsley&Mithal. Ao mesmo tempo, para as faixas de taxas de erros muito baixas ou muito altas seu desempenho se aproxima do máximo possível de se obter por um protocolo ARQ.

Estes resultados sugerem a utilização da nova estratégia em comunicações a altas velocidades fim-a-fim onde a taxa de erro é muito baixa a maior parte do tempo e ruidoso durante intervalos de tempo muito curtos. Em resumo, o esquema proposto apresenta baixa complexidade de implementação, requer baixa carga de processamento e é bastante robusto nas faixas de taxas de erros encontradas em redes de altas velocidades.

Referências

[1] W. A. Doeringer, D. Dykeman, M.Kaiserwerth, B. W. Meister, H. Rudin e R. Williamson, "A survey of light-weight transport protocol for high-speed networks", *IEEE Transactions on Communications*, vol. COM-38, no. 11, pp. 2025–2038, novembro 1990.

[2] M. C. Easton, "Batch throughput efficiency of ADCCP/HDLC/SDLC selective repeat protocols", *IEEE Transactions on Communications*, vol. COM-28, no. 2, pp. 187–195, fevereiro 1980.

[3] O. C. Duarte e H. M. de Lima, "A new selective repeat scheme - actual environment analysis", in *IEEE International Conference on Communications ICC88*, Philadelphia, pp. 22.2.1–22.2.6, junho 1988.

[4] O. C. Duarte e H. M. de Lima, "Improving the satellite efficiency of the accumulative acknowledgement strategies", in *IEEE Global Telecommunications Conference GLOBECOM89*, Dallas, pp. 48.6.1–48.6.5, novembro 1989.

[5] 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.

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

[7] H. M. de Lima e O. C. Duarte, "Um protocolo de retransmissão contínua para comunicação de dados a alta velocidade", in *V Simpósio Brasileiro de Microondas e X Simpósio Brasileiro de Telecomunicações TELEMO92*, Brasília, DF, pp. 439–444, julho 1992.

[8] B.T.Doshi, P.K.Johri, A.N.Netravali e K.K.Sabnani, "Error and flow control performance of a high speed protocol", *IEEE Transactions on Communications*, vol. COM-41, no. 5, pp. 707–720, maio 1993.

[9] G. Benelli, "Some ARQ protocols with finite receiver buffer", *IEEE Transactions on Communications*, vol. COM-41, no. 4, pp. 513–523, abril 1993.

[10] G. Benelli, "A selective ARQ protocol with a finite-length buffer", *IEEE Transactions on Communications*, vol. COM-41, no. 7, pp. 1102–1111, julho 1993.

[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] 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.

[14] 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.

[15] S. R. Chandran e S. Lin, "Selective-repeat-ARQ schemes for broadcast links", *IEEE Transactions on Communications*, vol. COM-40, no. 1, pp. 12–19, janeiro 1992.

[16] H. M. de Lima e O. C. Duarte, "Um novo protocolo multiponto para comunicação via satélite a alta velocidade", in *XI Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores SBRC'93*, Campinas, pp. 616–630, maio 1993.

[17] H. M. de Lima e O. C. M. B. 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.

[18] J. L. Wang e J. A. Silvester, "Optimal adaptative multireceiver ARQ protocols", *IEEE Transactions on Communications*, vol. COM-41, no. 12, pp. 1816–1829, dezembro 1993.