

AVALIAÇÃO COMPARATIVA DOS MECANISMOS CONGESTION AVOIDANCE TCP SACK E VEGAS OPERANDO SOBRE UMA REDE ATM VIA SATÉLITE

Haroldo Zattar

Departamento de Engenharia Elétrica
Universidade Federal de Mato Grosso – UFMT
78000-000 Cuiabá MT – Brasil

RESUMO

Diversas pesquisas avaliando os mecanismos *Congestion Avoidance* TCP sobre redes ATM via satélite são encontradas em teses e artigos. A conclusão obtida pelos estudos indica que o TCP SACK (*Selective Acknowledgement*) apresenta uma performance superior ao TCP Tahoe, Reno e New-Reno. Essa superioridade ocorre porque com o SACK, o transmissor pode obter informações suficientes do receptor com referência aos segmentos recebidos corretamente e dessa forma é capaz de retransmitir múltiplos segmentos perdidos de uma janela de congestionamento durante um RTT (*Round Trip Time*). Este artigo descreve o comportamento do TCP Vegas que segundo pesquisa literária ainda não foi avaliado operando sobre uma rede ATM via satélite e apresenta a performance por ele alcançada atuando em diferentes tipos de tráfego para então comparar os resultados obtidos por meio de simulações com o TCP SACK. Além disso, este artigo apresenta a avaliação da performance das duas implementações utilizando o recurso da janela de dados TCP aumentada e da janela de congestionamento inicial maior que um segmento.

1. INTRODUÇÃO

ATM é uma técnica de comutação rápida de pacotes baseada em padrões abertos que serve de transporte comum para todos os tipos de tráfego, como o de voz, dados, imagem e vídeo. Atualmente, são amplamente reconhecidos os benefícios e as vantagens da implantação de uma rede ATM via satélite, tais como, a conectividade com regiões de difícil acesso para instalação de infra-estrutura terrestre; o oferecimento de serviços de alta velocidade e QoS para uma área geograficamente distribuída.

O protocolo TCP aplicado às redes ATM via satélite apresenta uma baixa performance devido ao longo tempo de propagação, às características de BER, caminhos assimétricos e à pequena utilização da banda passante disponível no canal. Em ambientes de satélite, onde ocorrem muitas perdas de células ocasionadas por erros de transmissão, o TCP interpreta como congestionamento qualquer segmento perdido ou o recebimento de três ACKs fora de ordem, e reduz o valor da

sua janela de congestionamento (CWND) para dar continuidade ao processo de transmissão de novos segmentos. Tendo em vista esses problemas, este artigo tem por objetivo a realização de um estudo comparativo da performance das implementações TCP SACK, e Vegas no ambiente de redes ATM via satélite.

Na seção seguinte, este artigo apresenta uma abordagem sucinta das principais características de uma rede ATM via satélite. A próxima seção apresenta os aspectos relevantes do protocolo TCP no tocante às suas vantagens relacionadas a sua utilização neste tipo de rede, bem como a motivação para a realização deste estudo. Em seguida, realiza-se a modelagem e simulação das implementações TCP objetivando-se uma avaliação da performance das mesmas. Para isto, considerou-se um cenário específico de rede ATM via satélite. Finalizando, este artigo apresenta os resultados de simulação obtidos, uma análise dos mesmos e as conclusões gerais.

2. REDES ATM VIA SATÉLITE

A estrutura básica de uma rede ATM via satélite é constituída de terminais de computador, da ASIU (*ATM Satellite Internetworking Unit*), modems para satélite, antenas e o satélite.

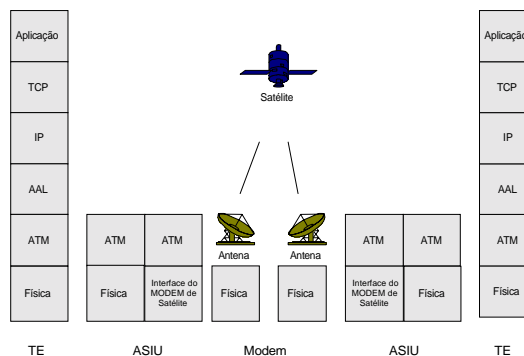


Figura 1. Pilha de protocolo para a rede ATM via satélite

A figura 1 ilustra a pilha de protocolo para uma rede ATM via satélite [1]. A ASIU é o componente principal dessa arquitetura, fazendo o papel de interface entre o *switch* ATM e o modem específico do satélite. Esse equipamento é responsável pelo gerenciamento e controle dos recursos do sistema.

3. VISÃO GERAL DO TCP

O TCP é um protocolo que fornece um serviço *full-duplex*, orientado à conexão, destinado ao transporte confiável de diversas aplicações (WEB, SMTP, FTP, TELNET, etc.). O TCP é responsável pelo transporte, controle de erro e de fluxo. Para este protocolo, cada vez que o transmissor envia um segmento ele aciona um temporizador (*timeout*). Ao receber um segmento livre de erros, o receptor envia um reconhecimento indicando o número do próximo segmento que espera receber. Se o temporizador do transmissor expirar antes do reconhecimento ser recebido, este segmento será retransmitido. A CWND controla o fluxo de segmentos na rede durante todo o intervalo de tempo de uma transmissão. Então o TCP utiliza a estratégia do mecanismo de aumento aditivo e diminuição multiplicativa para alterar o tamanho da CWND em função do estado de congestionamento na rede. A transmissão é iniciada com o envio de um segmento e a CWND é aumentada exponencialmente para cada ACK não duplicado recebido até atingir a máxima capacidade disponível no canal de transmissão. Essa operação é conhecida como técnica *Slow Start* e a capacidade estimada como limite máximo permitido de segmentos na rede é chamada de limitante ($ssthresh$ - *Slow Start Threshold*) [2]. Quando a CWND atinge o valor do limitante, o TCP passa a operar com a técnica *Congestion Avoidance*, aumentando a CWND de um segmento a cada RTT. O aumento da CWND é interrompido quando uma perda de segmentos é detectada ou quando atinge o tamanho da janela de aviso do receptor (AWND - *Advertisement Window*) fornecida pelo receptor. Dois mecanismos estão disponíveis para detecção de perdas: o *timeout* e a técnica *Fast Retransmit* que reduz a CWND para a metade do valor atual quando a presença de ACKs duplicados é notificada. Este algoritmo aciona a técnica *Slow Start* para a transmissão de novos segmentos. A técnica *Fast Recovery* é empregada após a fase *Fast Retransmit* com intuito de aumentar a performance do protocolo TCP. Quando o TCP transmissor recebe o primeiro ACK de um novo segmento a CWND é ajustada para o valor de $ssthresh$ e a técnica *Congestion Avoidance* entra em operação ao invés da técnica *Slow Start*. Entretanto, se o tempo de retransmissão dos segmentos descartados ultrapassar o *timeout*, o TCP passa a iniciar a transmissão de novos segmentos utilizando a técnica *Slow Start*.

Para as redes ATM via satélite, devido à grande distância entre os *hosts* e o satélite, o atraso de propagação é elevado e conseqüentemente a eficiência dos mecanismos de controle de

congestionamento TCP é baixa. Pode-se citar os seguintes fatores responsáveis por essa baixa performance:

- tempo de propagação em ambientes de satélite geoestacionários é muito alto, fazendo com que o TCP transmissor espere um longo tempo pelo ACK (mais que 200 ms).
- O valor do BDP (*Bandwidth Delay Product*) é muito alto, possibilitando a transmissão de muitos segmentos sem a necessidade do recebimento de reconhecimento proveniente do receptor. Mesmo assim o protocolo TCP apresenta uma baixa eficiência devido ao descarte de segmentos que ocorre durante a transmissão, acionando diversas vezes a técnica *Slow Start*.
- O tamanho da CWND é reduzido a 1 segmento toda vez que o TCP inicia a fase *Slow Start*. Isso implica numa baixa capacidade de utilização da banda passante do canal durante os instantes iniciais do *Slow Start*. Com intuito de elevar a performance do TCP foram desenvolvidas diversas implementações TCP. Este artigo avalia a performance do TCP SACK e Vegas numa rede ATM via satélite.

A opção SACK [3] aumenta a performance do TCP em redes de alta velocidade e com alto atraso. Com a técnica SACK, o transmissor obtém informações suficientes sobre os segmentos recebidos corretamente pelo receptor e dessa forma é capaz de retransmitir em um RTT múltiplos segmentos perdidos de uma janela de dados TCP. Muitos estudos foram realizados com as implementações TCP sobre uma rede ATM via satélite [4][5][6] e os resultados obtidos mostram que o TCP SACK comparado ao Tahoe, ao Reno e ao NewReno é a implementação TCP que apresentou a melhor performance.

O TCP Vegas [7][8] é uma implementação introduzida no TCP por meio de algumas modificações realizadas no mecanismo de controle de congestionamento no lado do transmissor. O TCP Vegas transmissor antecipa o princípio de congestionamento monitorando a diferença entre a taxa esperada e a taxa real. O Vegas usa a estratégia de ajuste da taxa de envio de dados da origem (CWND) na tentativa de manter um número reduzido de segmentos armazenados nos *switches* durante uma transmissão. O TCP Vegas possui um mecanismo de retransmissão que registra o tempo despendido para o envio de cada segmento. O Vegas utiliza essa estimativa precisa de RTT para retransmitir os segmentos. O mecanismo *Congestion Avoidance* do TCP Vegas utiliza uma técnica de achatamento da taxa de envio em caso de indicativo de congestionamento. Esse mecanismo no Vegas é baseado no cálculo da estimativa da vazão da conexão que limita o valor mínimo e máximo para a vazão de uma conexão TCP. O algoritmo opera de modo a manter a vazão dentro desse limite, executando esse controle por meio da CWND.

A técnica *Slow Start* do TCP Vegas visa monitorar a banda passante disponível na conexão de modo a detectar e evitar perdas de segmentos na fase *Slow Start*. A mudança realizada no Vegas permite que ocorra um crescimento exponencial do número de segmentos a ser enviado apenas a cada dois intervalos de RTT. Durante um dos intervalos de RTT, a CWND fica fixa e desse modo realiza-se uma comparação entre a taxa esperada e a taxa real. Quando a taxa real é menor que a taxa esperada, o Vegas muda da fase de *Slow Start* para o modo *linear increase/decrease*. O motivo de se medir a taxa real com uma CWND mantida fixa é que a taxa real representa a banda passante permitida pela conexão. Então pode-se apenas enviar o número de dados que foram reconhecidos dentro do ACK.

4. TCP SOBRE UBR

Nas redes ATM via satélite ocorrem perdas de células ocasionadas pela alta taxa de erros. O TCP interpreta como congestionamento qualquer segmento perdido ou o recebimento de três ACKs fora de ordem e, desse modo, reduz o valor da sua janela de congestionamento para dar continuidade ao processo de transmissão de novos segmentos. Nesse contexto, a categoria de serviço UBR é bastante apropriada, uma vez que não possui nenhum mecanismo de controle de congestionamento e sua implementação é relativamente simples. Com a utilização do UBR, o controle de congestionamento fica a cargo do TCP.

Por não ser imprescindível o gerenciamento de *buffer* do *switch*, o mecanismo *Tail Drop* é o mais indicado para UBR, porque permite compartilhar todo o espaço de *buffer* entre as conexões [9]. O *Tail Drop* utiliza a regra de enfileiramento FIFO. Assim, quando o tamanho de *buffer* do *switch* atinge 100 % da sua capacidade, as próximas células recebidas são descartadas na seqüência em que chegam e o TCP se responsabiliza pela retransmissão

5. AVALIAÇÃO DA PERFORMANCE DO TCP SACK E VEGAS

Para investigar e comparar o TCP Vegas com o TCP SACK, este trabalho utilizou o cenário da rede ilustrado na figura 2 que representa uma interconexão entre as redes de computadores de uma empresa situada em São Paulo e sua filial em Cuiabá. Para este estudo baseado em modelagem e simulação utilizou-se um programa simulador denominado NS (*Network Simulator*), versão 2.1b6 [10].

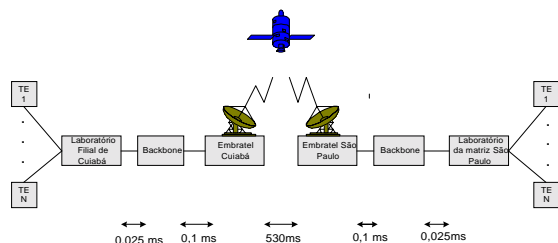


Figura 2. Cenário da rede ATM via satélite

5.1 Configuração da rede ATM Via Satélite

Com intuito de investigar a performance do TCP Vegas e do TCP SACK operando sobre a rede ATM via satélite, as simulações foram realizadas utilizando as fontes de tráfego CBR e VBR com distribuição Pareto. Para a realização das simulações os principais parâmetros de entrada considerados nas simulações estão relatados abaixo:

- 1- Tamanho de *buffer* do *switch* da Embratel e dos backbones igual a 12.000 células e 1.200 células para o tamanho de *buffer* dos *switches* dos laboratórios.
- 2- Erro Exponencial pela taxa = 5 % para o enlace de satélite.
- 3- Estação de Cuiabá: latitude = 15° 38' 40,2" e longitude = 56° 0' 30,9"
- 4- Estação de São Paulo: Latitude = 23,54° e longitude = 46,71°
- 5- Satélite: BRASILSAT-2 = 65°
- 6- Tamanho máximo do segmento (MSS) = 9.180 bytes

5.2 Análise e apresentação dos resultados

5.2.1 Fonte de Tráfego CBR

Para a modelagem de uma aplicação TCP/IP tipo FTP (File Transfer Protocol) considerou-se a fonte de tráfego tipo CBR. Os resultados obtidos com relação a CWND, número de segmentos recebidos pelo TCP de destino e a eficiência são apresentados na figura 3.

Pela análise dos gráficos pode-se constatar que o tamanho da CWND do TCP Vegas foi superior ao do TCP SACK. Em consequência disso o TCP Vegas transmitiu uma quantidade maior de segmentos (332) do que o TCP SACK (294) durante os 40 s em que ocorreu a simulação. Nesse contexto, o TCP Vegas é mais apropriado para aplicações do tipo FTP aplicada sobre a rede ATM via satélite. O TCP Vegas apresentou a melhor eficiência (0,45 %) para a rede porque o controle de congestionamento foi realizado sem a necessidade da ocorrência de perdas. O TCP Vegas controla o congestionamento na rede monitorando o resultado obtido da diferença entre a taxa real e a taxa esperada para então ajustar o tamanho da CWND. Desse modo observou-se que nenhuma vez a técnica *Slow Start* foi acionada durante a simulação.

O TCP SACK proporciona ao TCP transmissor obter informação suficiente dos segmentos que foram recebidos corretamente de uma determinada CWND por parte do receptor. Porém sob um estado de perdas severo aconteceu o descarte da informação de SACK e o transmissor passou a enviar os segmentos iniciando com uma CWND de tamanho unitário por 3 vezes durante a simulação, como

pode ser visto na figura 3, com o gráfico relacionado a CWND em função do tempo. Isso ocasionou a redução na performance do TCP SACK (0,4 %).

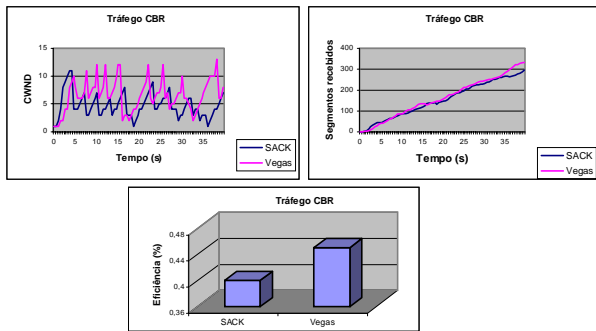


Figura 3. Comparação da CWND, número de segmentos recebidos vs tempo e da eficiência - Tráfego CBR

5.2.3 Fonte de Tráfego VBR com distribuição Pareto

Nesta etapa, considera-se que as aplicações TCP/IP foram modeladas como uma fonte de tráfego VBR com distribuição Pareto para novamente modelar uma aplicação do tipo web. Para isto, utiliza-se a condição *shape* (SH) da distribuição Pareto igual a 2.

O primeiro estudo foi realizado com o tempo da rajada fixado em 1 s e os resultados obtidos nas simulações são apresentados na figura 7. Pela figura pode-se constatar que, à medida que o valor de *Idle Time* aumenta, a performance das duas implementações é reduzida. O TCP Vegas apresentou performance superior à do TCP SACK até o *Idle Time* igual a 1 s.

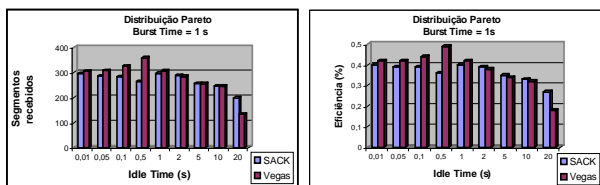


Figura 7. Número de segmentos recebidos e eficiência vs. *Idle Time* - distribuição Pareto com *shape* = 2 e tempo da rajada igual a 1s.

A melhor vazão foi obtida para *Idle Time* igual a 0,5 s onde o TCP Vegas apresentou melhor performance recebendo 358 segmentos apresentando eficiência igual a 0,49 %. Esse resultado pode ser observado visualizando o gráfico relativo a eficiência em função do *Idle Time*. Os resultados obtidos quando o valor do *shape* foi igual a 2 e o tempo da rajada fixado em 10 s são apresentados na figura 8.

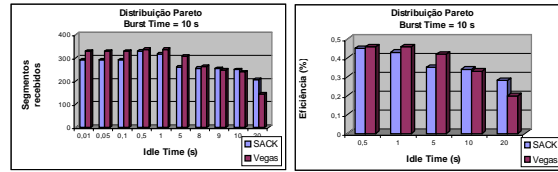


Figura 8. Número de segmentos recebidos e eficiência vs. *Idle Time* distribuição Pareto - *shape* = 2 e tempo da rajada igual a 10 s.

Pela análise do gráfico referente ao número de segmentos enviado em função do *Idle Time*, pode-se concluir que para essa condição o aumento do *Idle Time* causa redução da eficiência para as duas implementações avaliadas. O TCP Vegas apresentou performance superior ao TCP SACK até o valor de *Idle Time* igual a 8 s. A melhor performance alcançada pela rede ATM ocorreu utilizando o TCP Vegas quando *Idle Time* foi igual 0,5 s e 1 s ocasionando uma transmissão de 337 segmentos resultando numa eficiência de 0,46 % conforme pode ser visualizado no gráfico da eficiência em função do *Idle Time*.

6. AVALIAÇÃO DO TCP VEGAS E SACK EM FUNÇÃO DO AUMENTO DA JANELA DE DADOS TCP E DA CWND

Um dos fatores importantes para que a arquitetura TCP/IP sobre redes ATM via satélite se torne atraente é fazer com que a banda passante disponível no enlace de satélite seja amplamente utilizada durante a transmissão de dados. Para que isso possa ocorrer, são propostas duas técnicas atuando no protocolo TCP.

6.1 Aumento da janela de dados TCP

A capacidade máxima da janela de dados TCP de 64KB num enlace de satélite resulta numa baixa eficiência causada pelo alto tempo de atraso de propagação e dessa forma a performance do protocolo TCP é severamente afetada. A solução reside na ativação do campo *window scale* do cabeçalho TCP que proporciona o aumento do tamanho da janela de dados TCP para que mais segmentos possam ser enviados da origem ao destino em um determinado intervalo de tempo. A figura 10 apresenta os resultados obtido da eficiência para o modelo da rede ATM via satélite da figura 2 sem a presença de erros nos enlaces e quando submetida a uma taxa de erro de 5 % utilizando a distribuição exponencial. Pela análise dos gráficos, pode-se observar que se a rede operar em condição de erro igual ou próximo de zero, a eficiência dos dois protocolos aumenta consideravelmente.

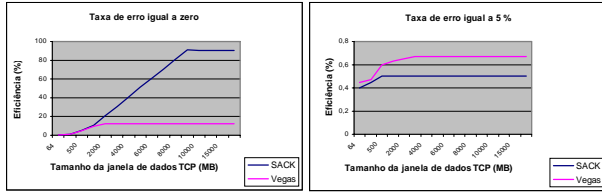


Figura 10. Eficiência vs. tamanho da janela de dados TCP.

O TCP Vegas apresentou eficiência máxima de 12,4 % a partir da janela de dados TCP igual a 2 MB. Para essa condição, verifica-se que o TCP SACK apresenta uma performance excelente com o aumento da janela de dados TCP atingindo uma eficiência da ordem de 90,8 % se aproximando da performance de uma rede utilizando somente enlaces terrestres. Para que uma alta performance seja alcançada na rede, o emprego da técnica de FEC (*Forward Error Correction*) é sugerido. A técnica FEC consiste na recuperação de bits corrompidos dos segmentos enviados pelo transmissor e desse modo possibilita reduzir a taxa de BER para valores entre 10^{-11} e 10^{-13} numa rede ATM via satélite. Isso pode ser comprovado observando a eficiência alcançada pelo TCP SACK na condição de erro igual a zero ilustrado na figura 10. A vantagem do emprego dessa técnica é que ela não interfere com os mecanismos TCP e desse modo é sugerida para utilização em redes ATM sobre satélite apesar do alto custo para sua implementação.

Visualizando a figura 10, quando a rede é submetida a uma taxa de erro de 5 % verifica-se que a eficiência obtida pelas duas implementações é muito baixa e nessa situação em que não ocorre recuperação de erros e sim retransmissões de segmentos efetuadas pelas implementações TCP, o TCP Vegas apresentou performance superior ao TCP SACK. A máxima eficiência obtida pelo TCP Vegas foi de 0,67 % quando o tamanho da janela de dados TCP foi de 3 MB, contra 0,5 % obtida pelo TCP SACK para a janela de dados TCP de 500 KB. Esse resultado comprova que, na presença de uma alta incidência de erros, o TCP Vegas é mais apropriado para ser empregado numa rede ATM utilizando a categoria de serviço UBR sobre satélite quando nenhum mecanismo de controle de erro for utilizado.

6.2 Aumento da CWND Inicial

O protocolo TCP inicia a transmissão de dados enviando um único segmento e aguardando o seu reconhecimento. A partir daí a cada intervalo de tempo (RTT) ocorre o aumento exponencial do número de segmentos a ser enviado da origem ao destino. O baixa performance do TCP ocorre exatamente durante os primeiros instantes da transmissão, quando o tamanho da CWND é muito pequeno, ocasionando uma baixa utilização da banda passante disponível no canal de transmissão. A solução proposta é aumentar o tamanho inicial da CWND de modo a reduzir o tempo requerido para alcançar o valor do limitante. As vantagens da utilização da CWND

inicial maior que o valor de um segmento se baseia nos seguintes fatos:

1. Para uma conexão que transmite uma pequena quantidade de dados, uma CWND inicial maior reduz o tempo de transmissão. Para transferências de *e-mails* e *web pages* que possuem tamanho menores que 4 KB, uma CWND inicial maior reduz o tempo de transferência de dados para um único RTT.

2. Para uma conexão que opera com uma CWND inicial grande, essa modificação elimina mais do que três RTTs e um *timeout* por ACK atrasado durante a fase inicial de *Slow Start*.

Essa pequena mudança no TCP gera grandes benefícios para a transferência de dados em enlaces de satélite. O valor máximo recomendado para a CWND inicial é de 2 segmentos para ambientes de satélite segundo a RFC 2581 [11]. Entretanto diversas pesquisas mostraram que o valor inicial da CWND inicial igual a 4 segmentos não provoca degradação da performance na rede [12][13]. O tamanho apropriado da CWND inicial para o TCP Vegas e SACK que fornece a maior eficiência sobre redes ATM via satélite é mostrado na figura 11.

Pela análise dos gráficos mostrado abaixo constata-se que, para a fonte de tráfego CBR de 64 KB e de 1 MB com ou sem incidência de erro aplicado ao TCP Vegas e SACK, o aumento da CWND inicial não surtiu grandes vantagens e desse modo pode-se afirmar que, para o transporte de um grande arquivo de dados, o aumento da CWND inicial não aumentou de modo satisfatório a eficiência da rede ATM via satélite que foi modelada neste artigo.

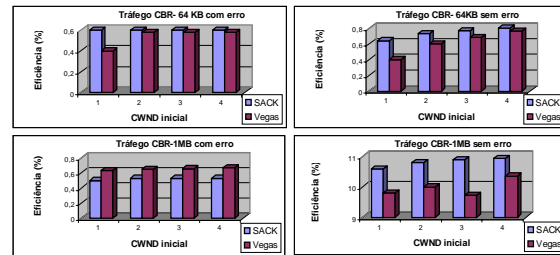


Figura 11. Eficiência vs. CWND inicial - transporte de um arquivo de dados extenso.

Porém, para transporte de um arquivo de dados de tamanho pequeno, como WEB e SMTP, a performance alcançada pelas duas implementações é apresentada na figura 12.

Observando o gráfico pode-se verificar que o aumento da CWND inicial elevou substancialmente a performance dos dois algoritmos principalmente para o tamanho de janela de dados TCP igual a 1 MB. Para a situação em que não acontece erros de transmissão, o TCP SACK apresentou performance superior ao TCP Vegas.

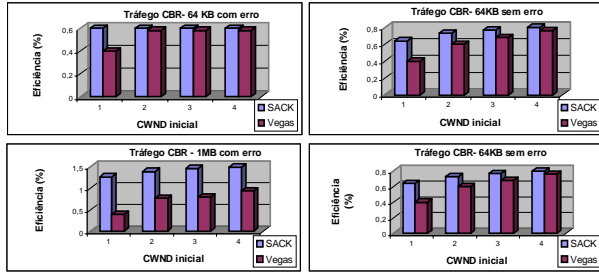


Figura 12. Eficiência vs. CWND inicial - transporte de um arquivo pequeno de dados

6. conclusões

O protocolo TCP aplicado às redes ATM via satélite apresenta uma baixa performance devido ao longo tempo de propagação, às características de BER, à pequena utilização da banda passante e caminhos assimétricos disponível no canal.

Este artigo apresentou uma avaliação das implementações TCP Vegas e SACK, considerando-se a modelagem das aplicações como fontes de tráfego CBR e VBR (distribuição Pareto). A partir dos resultados obtidos para o modelo fonte de tráfego CBR, constatou que o TCP Vegas apresentou performance superior ao TCP SACK. Isto se deve ao princípio de operação do TCP Vegas que preconiza a monitoração do estado da rede a cada RTT, ajustando-se a CWND e controlando-se assim o congestionamento na rede. Esse procedimento diferencia o TCP Vegas das outras implementações TCP, as quais necessitam da ocorrência de alguma perda de segmento para reduzir a CWND e, conseqüentemente reduzir a vazão na rede.

Para o modelo de tráfego VBR com distribuição Pareto, constatou-se que quanto maior for o tempo de rajada, mesmo que o *Idle Time* seja maior que 1 s, o TCP Vegas garante a melhor performance.

Com relação aos resultados apresentados pelos dois mecanismos *Congestion Avoidance*, para uma janela de dados TCP igual a 1 MB, a performance do TCP SACK foi extraordinariamente superior a que foi apresentada pelo TCP Vegas quando a rede possui um mecanismo de correção de erro como FEC. Sem a presença de técnicas que executam a correção de segmentos com bits corrompidos, o TCP Vegas apresentou melhor performance para o cenário da rede ATM via satélite utilizada neste artigo.

O estudo do aumento da CWND inicial mostrou que, para transferência de arquivos de dados pequenos, iniciar a CWND com valor maior que 1 segmento resulta num aumento substancial na performance da rede. Entretanto, para a transmissão de um arquivo de dados extenso, o aumento do valor da CWND inicial resulta num pequeno aumento da performance das implementações TCP avaliadas.

8- Referências Bibliográficas

- [1] JAKYILDIZ, I.F., JEONG, S. "Satellite ATM Network: A Survey". IEEE Communications Magazine, p. 30-43, July, 1997.
- [2] STEVENS, W. "TCP Slow Start, Congestion Avoidance, Fast Retransmit and Fast Recovery Algorithms, RFC 2001". January, 1997.
- [3] MATHIS, M., MAHDAVI, J., FLOYD, S., ROMANOV, A. "TCP Selective Acknowledgment Option RFC 2018". October, 1996.
- [4] GOYAL, R. "Traffic Management for TCP/IP over Asynchronous Transfer Mode (ATM) Networks". PHD thesis, Ohio State University. 1999.
- [5] CHARALAMBOUS, C.P. "Performance Evaluation and Analysis of TCP on ATM over High Bandwidth Delay Products Networks". Master thesis, University of Colorado at Denver. 1996.
- [6] CHARALAMBOUS, C.P. et. Al. "Experimental and Simulations Results of TCP/IP over High-Speed ATM over ACTS". Proceedings of 1996 IEEE International Conference on Communications, Atlanta, Georgia. June, 1998.
- [7] MO, J. et.al. "Analysis and Comparison of TCP Reno and Vegas, Department of Electrical Engineering and Computer Sciences, University of California at Berkeley. July, 1998.
- [8] STEVEN, L., PETERSON, L., WANG, L., "Understanding TCP Vegas-Theory and Practice". University of Melbourne and Princeton University, TR 616-00. February, 2000.
- [9] GOYAL, R. "Traffic Management for TCP/IP over Satellite ATM Networks". IEEE Communications Magazine p.56-61. March, 1999.
- [10] MCCANNE, S., FLOYD, S. "NS(Network Simulator)". available at <http://www-mash.cs.berkeley.edu/ns/>.
- [11] ALLMAN, M., STEVENS, W. "TCP Congestion Control - RFC 2581. April, 1999.
- [12] HAYES, C., OSTERMANN, S. "An Evaluation of TCP with Large Initial Windows". ACM Computer Communication Review. July, 1998.
- [13] ALLMAN, M., et al. "Ongoing TCP Research Related to Satellites - RFC 2760". February, 2000.