

# Gerenciamento Ativo de Filas para o protocolo HSTCP em Redes com Produto Banda-Atraso Elevado

Juliana de Santi<sup>1</sup>, Nelson L. S. da Fonseca (Orientador)<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Instituto de Computação – Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP)  
Caixa Postal 6167 – 13084-971 – Campinas – SP – Brasil

santi@ic.unicamp.br, nfonseca@ic.unicamp.br

***Abstract.** This paper introduces the optimal controller HSTCP-H2 AQM for networks which employ the HSTCP protocol as their transport protocol. The synthesis of the controller uses a non-rational approach, in which stability and performance objectives are completely expressed as Linear Matrix Inequalities (LMIs). Results, derived via simulation, show the advantages of adopting HSTCP-H2 rather than RED in high capacity networks.*

***Resumo.** Este artigo apresenta um controlador ótimo HSTCP-H2 para gerenciamento ativo de filas em redes que empregam o protocolo de transporte HSTCP. A síntese do controlador utiliza uma abordagem não racional, na qual a estabilidade e os objetivos de desempenho são completamente expressos e solucionados através de Desigualdades Matriciais Lineares (Linear Matrix Inequalities (LMIs)). Resultados, obtidos através de simulações, demonstram as vantagens do HSTCP-H2 em relação a política padrão RED em redes de alta velocidade.*

## 1. Introdução

Os enlaces de fibra óptica da Internet propiciaram uma grande disponibilidade de banda passante, viabilizando a transferência eficiente de grandes volumes de dados, como por exemplo, a transferência de dados nas aplicações de *e-Science*, que tipicamente transmitem taxas da ordem de Gigabps e ao longo de distâncias superiores a 10,000 Km.

Redes que envolvem grande disponibilidade de banda passante e grandes distâncias entre emissor e receptor são chamadas redes com produto banda-atraso elevado (PBA). Estas redes são de especial importância pois em seus enlaces pode haver uma grande quantidade de dados em trânsito, o que implica que reações à mudanças no estado de utilização dos enlaces da rede devam ser as mais precisas possíveis.

O TCP Reno, o protocolo da camada de transporte responsável por 83 ± 11% dos bytes transmitidos na Internet [Fomenkov et al. 2004], apresenta uma série de deficiências, dentre as quais a operação ineficiente em redes com PBA elevado [Chen and Bensaou 2007]. Na realidade, a falta de especificidade no projeto do TCP Reno possibilitou a sua rápida difusão, porém ignora as características “físicas” da rede na qual o protocolo é executado. Tal ineficiência decorre da dinâmica do mecanismo de controle de congestionamento do TCP, que limita o crescimento da janela de transmissão. Esta dinâmica implica em um crescimento lento da janela de transmissão em redes com PBA elevado bem como o uso ineficiente da banda passante disponível. Para se ter uma idéia de tal ineficiência, cita-se que para uma conexão TCP possa manter uma taxa de envio de 10 Gbps deve ocorrer no máximo uma perda de pacotes a cada 5.000.000.000

transmitidos, o que equivale a no máximo uma perda a cada 1h e 40m. Tais valores de probabilidade de perda são irrealistas com a atual tecnologia de fibras ópticas, dado que são inferiores ao limite teórico de taxa de erro das atuais tecnologias de enlace.

Na realidade, o TCP Reno é o gargalo em redes com PBA elevado, tornando de pouca valia a grande quantidade de banda disponível nestas redes. Para contornar os problemas apresentados pelo TCP Reno em redes com PBA elevado, diversas variantes do TCP tem sido propostas nos últimos anos [Katabi et al. 2002, Floyd 2002]. Dentre elas, escolheu-se investigar o *High Speed TCP* (HSTCP) [Floyd 2002], por sua simplicidade, por ter sido uma proposta pioneira e por ser uma das mais populares.

O mecanismo de Gerenciamento Ativo de Filas (*Active Queue Management - AQM*) monitora o tamanho da fila nos roteadores a fim de tomar decisões sobre a notificação/descarte de pacotes dos emissores TCP. O mecanismo de AQM tenta evitar que as filas nos roteadores transbordem e ocorra uma grande perda de pacotes, detectando o congestionamento incipiente. O mecanismo AQM deve operar de forma cooperativa com o mecanismo de congestionamento do TCP, para evitar instabilidades no uso da banda passante, acarretando períodos alternados de sub e de super utilização dos enlaces.

*Random Early Detection* (RED) é a política de AQM recomendada pela *Internet Engineering Task Force* (IETF) para ser implementada na Internet. No entanto, quando os parâmetros de RED não são adequadamente definidos seu desempenho pode tornar-se pior do que em cenários nos quais AQM não é adotado. Para superar estas dificuldades, estudos baseados em heurísticas para atribuir os valores dos parâmetros de RED foram desenvolvidos [Floyd 1997]. No entanto, estes não asseguram que um ponto de equilíbrio seja alcançado, nem garantem estabilidade do tamanho da fila.

Uma das abordagens sistemáticas para a derivação de controladores usa Teoria de Controle que considera a natureza intrínseca de retroalimentação do congestionamento na rede, a fim de ajustar a taxa de transmissão dos nós fontes, de acordo com o estado de congestionamento. A notificação do congestionamento para as fontes é realizada através do descarte/marcação de pacotes. Desta forma, os controladores são responsáveis por determinar a probabilidade de descarte/marcação adequada, a fim de maximizar a vazão, minimizar perdas e estabilizar o tamanho da fila, independentemente das variações das condições da rede. A estabilidade em sistemas de AQM é essencial para a prevenção da variação do retardo (*jitter*) e baixa utilização da banda.

O presente artigo descreve uma nova política de AQM, HSTCP-H2, introduzida na dissertação de mestrado [Santi 2008], para redes com produto banda-atraso elevado que utilizam o protocolo de transporte HSTCP. A política proposta permite que os objetivos desejados para o sistema façam parte do projeto do controlador, para tal, emprega controladores ótimos ao invés de controladores clássicos, pois estes não permitem a introdução dos objetivos no projeto bem como são sensíveis à incertezas de modelagem.

O diferencial do mecanismo proposto é o uso de uma abordagem não-racional que supera a principal dificuldade de provar a estabilidade relativa à parte com atraso do sistema [Oliveira and Geromel 2004]. Sabe-se que o controle independente de atrasos apresenta limitações de desempenho na presença de atrasos longos [Park 1999]. No contexto de redes de computadores, o uso desta abordagem permite maior eficiência na utilização da banda disponível. Ademais, nesta abordagem, estabilidade e objetivos de

desempenho são completamente expressos como Desigualdades Matriciais Lineares (*Linear Matrix Inequalities* - LMIs), o que requer a solução de um problema convexo simples para o cálculo dos parâmetros do controlador, envolvendo um baixo custo computacional. A planta utilizada representa o sistema de forma detalhada e considera a presença de tráfego que não está sujeito ao controle de congestionamento (não-adaptativo, UDP). Desta forma, a estabilidade da planta implica na estabilidade do sistema.

O controlador HSTCP-H2 foi implementado no simulador NS-2, ferramenta largamente utilizada para pesquisa em redes de computadores, e foi extensivamente avaliado e comparado com RED em diferentes cenários de redes, envolvendo múltiplos enlaces gargalos e diferentes tipos de tráfego. Resultados derivados demonstram que o desempenho do HSTCP-H2 é significativamente superior ao desempenho de RED.

A relevância do presente trabalho diz respeito a viabilização do uso eficiente do protocolo TCP em redes de alta velocidade. A originalidade do mesmo refere-se a introdução dos objetivos de desempenho na especificação do projeto, utilizando, para tal, Teoria de Controle Ótimo no projeto de controladores para o gerenciamento ativo de filas e a construção do controlador propriamente dito. O emprego de AQM, com objetivos de desempenho especificados em projeto, para a variante do TCP para redes de alta velocidade é um trabalho inédito na literatura. Os resultados derivados na dissertação [Santi 2008] foram relatados nos seguintes artigos científicos: [Santi et al. 2007], [Santi et al. 2008a], [Santi et al. 2008b] e [Santi et al. 2009]. Na época da submissão e publicação destes artigos, todos os veículos eram classificados como Qualis A.

Este trabalho está organizado conforme se segue. Na Seção 2, apresenta-se o protocolo *High Speed* TCP. Na Seção 3, introduz-se o projeto do controlador HSTCP-H2. Na Seção 4, compara-se o desempenho do HSTCP-H2 com o desempenho de RED. Na Seção 5, apresentam-se as considerações finais.

## **2. Mecanismos de Controle de Congestionamento High Speed TCP**

No protocolo HSTCP [Floyd 2002], quando o tamanho da janela de congestionamento é menor que 38 *Maximum Segment Size* (MSS) a função de resposta do TCP Reno é empregado. Caso contrário, aumenta-se a janela de congestionamento utilizando uma função mais agressiva e reduz-se o tamanho da janela de forma mais suave. A agressividade no crescimento e a suavidade na redução do tamanho da janela objetivam permitir que a janela de congestionamento retorne rapidamente para seu valor operacional ideal e, conseqüentemente, melhore a utilização do enlace. Estes ajustes do HSTCP seguem a clássica abordagem *Additive Increase Multiplicative Decrease* (AIMD), mas os valores de crescimento e redução para a janela de congestionamento são calculados em função do tamanho corrente da janela de congestionamento [Huang et al. 2004].

## **3. Projeto do Controlador Ótimo HSTCP-H2-AQM**

O projeto do controlador é derivado a partir das equações que descrevem a dinâmica do sistema TCP-AQM. As equações diferenciais estocásticas a seguir capturam o comportamento do tamanho da janela de congestionamento do HSTCP e a variação do tamanho da fila [Sonkoly et al. 2005]:

$$\dot{W}(t) = \frac{a(t)}{R(t)} - b(t)W(t) \frac{W(t-R(t))}{R(t-R(t))} p(t-R(t)) \quad (1) \quad \dot{q}(t) = \frac{N(t)W(t)}{R(t)} - C + \omega_q(t) \quad (2)$$

onde:  $W(t)$  é o tamanho médio da janela em pacotes;  $q(t)$  é o tamanho da fila em pacotes;  $R(t)$  é o *Round Trip Time* (RTT) em segundos;  $a(t)$  é o parâmetro de crescimento da janela;  $b(t)$  é o parâmetro de redução da janela;  $p(t)$  é a probabilidade de descarte/marcação;  $N(t)$  é o número de conexões;  $C(t)$  é a capacidade do enlace em pacotes/segundo;  $\omega_q(t)$  é o ruído produzido por fluxos UDP.

A equação (1) descreve o comportamento da janela do HSTCP. O primeiro termo modela o incremento aditivo da janela e o segundo termo modela o decremento multiplicativo. A equação (2) expressa a variação do tamanho da fila como a diferença entre a taxa de chegada,  $NW/R + \omega_q(t)$ , e a capacidade do enlace,  $C$ . O termo  $\omega_q(t)$  considera os fluxos UDP na dinâmica do tamanho da fila. Fluxos UDP não reduzem sua taxa de transmissão sob congestionamento e, portanto, sua inclusão confere ao modelo uma correspondência com a realidade e diversidade de tráfego existente na Internet.

Para a derivação do controlador, as equações (1) e (2) são linearizadas e o sistema pode ser representado na forma de estado de espaço pelas seguintes equações:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= A_0x(t) + A_1x(t-R_0) + B_w w(t); & z(t) &= C_{z0}x(t) + C_{z1}x(t-R_0) + D_{zu}u(t); \\ y(t) &= C_yx(t-R_0) + D_{yw}w(t); \end{aligned} \quad (3)$$

onde  $x(t)$  é o vetor de estado;  $u(t)$  é a entrada a ser controlada que representa a probabilidade  $p(t)$ ;  $w(t)$  o ruído externo produzido pelas fontes UDP;  $z(t)$  a saída de referência, ou seja, a saída esperada para o sistema e  $y(t)$  a saída obtida para o sistema.

O sistema descrito em (3) deve ser conectado ao controlador (4):

$$\dot{\hat{x}}(t) = \hat{A}_0\hat{x}(t) + \hat{A}_1\hat{x}(t-R_0) + \hat{B}y(t); \quad u(t) = \hat{C}_0\hat{x}(t) + \hat{C}_1\hat{x}(t-R_0) + \hat{D}y(t); \quad (4)$$

O objetivo é determinar as matrizes do controlador (4) que estabilizam (3), enquanto minimizam uma certa medida de referência  $z(t)$ . Para alcançar o objetivo deste projeto, é necessário definir os objetivos de desempenho para a saída  $z(t)$ , bem como o que deve ser medido na saída  $y(t)$ .

O valor ideal para a probabilidade de descarte/marcação deve maximizar a taxa de transmissão, minimizar o tamanho da fila e prevenir a perda de pacotes. Para atingir estes objetivos, as matrizes do sistema (3) são definidas como:

$$A_0 = \begin{bmatrix} -\frac{a_0 N_0}{R_0^2 C_0} & -\frac{a_0}{C_0 R_0^2} \\ \frac{N_0}{R_0} & -\frac{1}{R_0} \end{bmatrix}, \quad A_1 = \begin{bmatrix} -\frac{a_0 N_0}{R_0^2 C_0} & \frac{a_0}{C_0 R_0^2} \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad B_w = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0.2C_0 & 0 \end{bmatrix}, \quad C_z = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ \frac{N_0}{R_0} & \frac{-1}{R_0} \\ 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

As matrizes  $A_0$ ,  $A_1$  e  $B_u$  são obtidas da linearização do sistema. A matrix  $A_0$  representa o termo do sistema sem atraso e a matriz  $A_1$  representa o termo com atraso.

O ruído gerado pelos fluxos UDP, é controlado por  $B_w$ . O valor escolhido,  $0.2C_0$ , permite que fluxos UDP utilizem até 20% da capacidade do enlace, o que é um limitante superior para a real proporção de tráfego UDP na Internet [Fomenkov et al. 2004].

Por meio de simulações, constatou-se que o objetivo “prevenção de subutilização do enlace e minimização do *jitter*” (matriz  $C_z$ ) é o que apresenta melhor desempenho para redes com PBA elevado. Para que o enlace não seja subutilizado, a diferença entre o valor

medido para o tamanho da fila ( $q$ ) e o valor ideal para a fila no ponto de equilíbrio ( $q_0$ ) deve ser minimizada, o que está representado na primeira linha da matriz  $C_z$ .

A variação de atraso, denominada *jitter*, é consequência da oscilação no tamanho da fila. Na segunda linha de  $C_z$ , embute-se a minimização da variação no tamanho da fila.

Definidos os objetivos de desempenho, o sistema (3) é conectado ao controlador (4) levando ao sistema linear com atraso:

$$\dot{\bar{x}}(t) = \mathcal{A}_0 \bar{x}(t) + \mathcal{A}_1 \bar{x}(t - R_0) + \mathcal{B}_w(t); \quad z(t) = \mathcal{C}_0 \bar{x}(t) + \mathcal{C}_1 \bar{x}(t - R_0) + \mathcal{D}_w(t). \quad (5)$$

Para assegurar a estabilidade do sistema (5), foi utilizados o Teorema 4 –  $b$  de [Oliveira and Geromel 2004]. Este teorema especifica que um sistema como (5), é assintoticamente estável e  $\|H_{wz}\|_2^2 < \gamma$ , se existem matrizes assimétricas e definidas positivas  $W$ ,  $Y_0$  e  $X_j$ , e matrizes  $F$ ,  $R$ ,  $L_j$  e  $Q_j$ , para  $j = 0, 1$ , tais que as seguintes LMIs tenham uma solução factível:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{A}_0 + \mathbf{A}_0^T + X_1 & (\bullet)^T & (\bullet)^T \\ \mathbf{A}_1^T & -X_1 & (\bullet)^T \\ \mathbf{C}_0 & \mathbf{C}_1 & -I \end{bmatrix} < 0, \quad \begin{bmatrix} W & (\bullet)^T \\ \mathbf{B} & \mathbf{P}_0 \end{bmatrix} > 0, \quad \text{trace}(W) < \gamma. \quad (6)$$

Este problema convexo foi numericamente resolvido, usando-se o software LMI-Sol [Oliveira and Geromel 2009]. Os parâmetros de rede utilizados foram  $R_0 = 200$  ms,  $C_0 = 83333$  pacotes/segundo, o que corresponde a uma capacidade de enlace de 1 Gb/s, pacotes de tamanho médio 1500 *bytes* e  $N_0 = 10$  fluxos HSTCP. Estes valores foram escolhidos para se obter um ponto de equilíbrio com probabilidade de perda  $p_0$  muito pequena, capaz de sustentar valores de janela de congestionamento elevados. Uma solução factível foi encontrada e, portanto, o sistema (5) é estável e os parâmetros do controlador (4) ficam determinados.

Para a implementação digital do controlador, escolheu-se uma frequência de amostragem,  $f_s = 10\%$  da capacidade do enlace  $C_0$ , de forma a obter uma representação no domínio- $z$ , a qual pode ser convertida na equação de diferença no tempo discreto  $kT$ , onde  $T = \frac{1}{f_s}$ :

$$\delta p_1(kT) = a\delta q(kT) + b\delta q((k-1)T) - c\delta q((k-2)T) + d\delta p_1((k-1)T) + e\delta p_1((k-2)T). \quad (7)$$

O algoritmo para o cálculo do valor da probabilidade de descarte/marcação do HSTCP-H2 é simples e é executado a cada intervalo de amostragem de  $1/f_s$  (Algoritmo 1). Calcula-se, inicialmente,  $p_0$  utilizando os parâmetros de rede dados ( $N_0$ ,  $C_0$ ,  $R_0$ ). Calcula-se, então, o valor da probabilidade de descarte/marcação, usando (7). O algoritmo precisa de quatro variáveis auxiliares:  $q_{old}$ ,  $p_{old}$ ,  $q_{old1}$  e  $p_{old1}$ , que são usadas para armazenar os valores de  $q$ ,  $p$ ,  $q_{old}$  e  $p_{old}$ , valores estes que são relativos ao último intervalo de RTT.

---

**Algoritmo 1** Cálculo da probabilidade de descarte/marcação para o HSTCP-H2-AQM

---

- 1:  $p_0 \leftarrow a_0 N_0^2 / b_0 (C_0 R_0)^2$
  - 2:  $p_1 \leftarrow q_0(c - a - b) + a * q + b * q_{old} - c * q_{old1} + p_0(1 - d - e) + d * p_{old} - e * p_{old1}$
  - 3:  $p_{old1} \leftarrow p_{old}$
  - 4:  $q_{old1} \leftarrow q_{old}$
  - 5:  $p_{old} \leftarrow p_0$
  - 6:  $q_{old} \leftarrow q_0$
-

## 4. Resultados Numéricos

Utilizou-se o Simulador ns2.29, onde foi implementado o Algoritmo 1, para realizar as simulações. Foram utilizadas uma topologia com um único enlace gargalo (*Dum-Bell* - Figura 1(a)) e outra com múltiplos enlaces gargalos (*Parking-Lot* - Figura 1(b)). A topologia *Dum-Bell* é amplamente utilizada em estudos envolvendo o protocolo TCP. O intuito ao considerar múltiplos gargalos é verificar a eficiência do controlador em redes altamente congestionadas. Devido a limitação de espaço, somente resultados para a topologia *Dum-Bell* e tráfego FTP são apresentados. Os resultados para topologia *Parking-Lot* com tráfego FTP e WEB podem ser vistos em [Santi 2008]. Os parâmetros de RED foram ajustados de acordo com as recomendações [Floyd 1997].

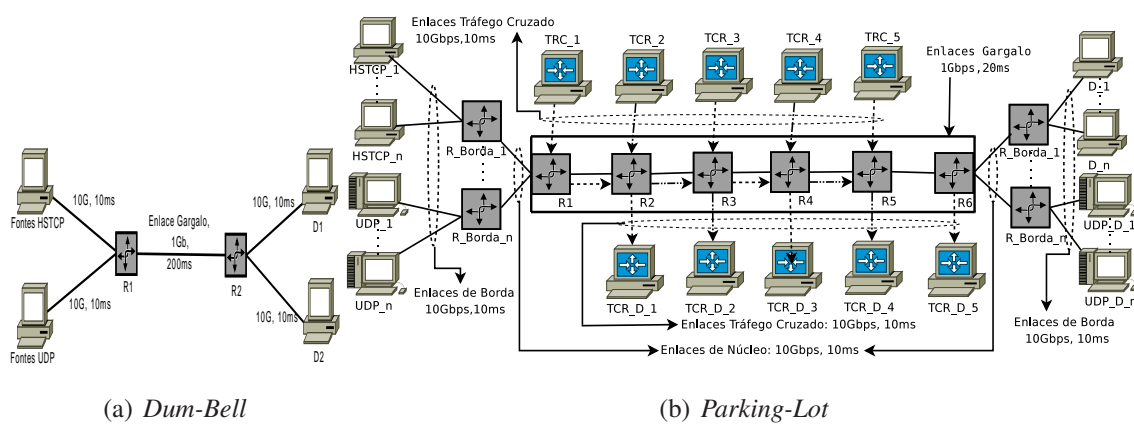


Figura 1. Topologias

A topologia, capacidade de enlace e atraso de propagação dos enlaces são apresentados na Figura 1(a). O enlace entre os nós  $R_1$  e  $R_2$  é o enlace gargalo. O tamanho do *buffer* é 20% do PBA, com pacotes de 1500 *bytes*. Variou-se a carga de 0.4 até 1.0, de forma a verificar a robustez do HSTCP-H2 sob diferentes cargas. O tráfego FTP, gerado por uma distribuição exponencial com média de 512 *KBytes*, parte das fontes HSTCP para o destino  $D_1$ . O controle de fluxo foi desabilitado de forma que o crescimento da janela do emissor fosse influenciado apenas pelas condições da rede e não pelo receptor.

Os roteadores são alimentados por fluxos HSTCP e UDP. Fluxos não adaptativos CBR/UDP, equivalente a 20% da capacidade do enlace, foram incluídos de forma a verificar a robustez do controlador AQM na presença de ruído. Eles são gerados e finalizados em diferentes intervalos das fontes UDP para o destino  $D_2$ .

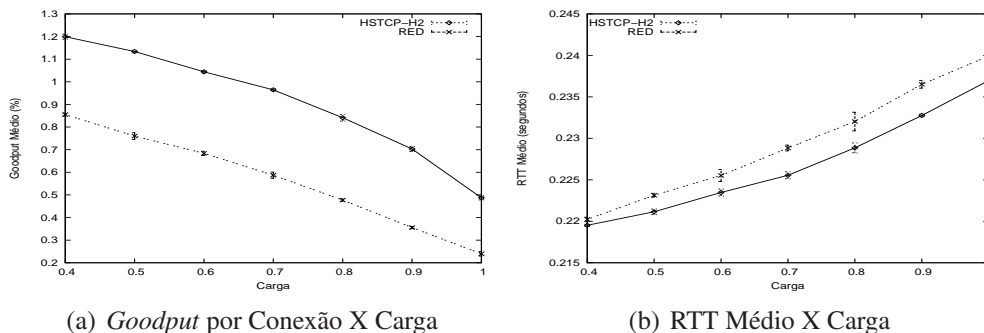


Figura 2. Resultados Numéricos



O *goodput* ou vazão útil indica qual a percentagem de dados enviados que realmente chegam ao receptor. Desta forma, mais significativo do que o *throughput* ou vazão, que determina a quantidade de dados enviados, o *goodput* revela o quão eficiente é a utilização da banda passante. A Figura 2(a) apresenta o *goodput* médio por conexão ativa dado por percentagem da capacidade do enlace em função da carga. O *goodput* é muito maior quando o HSTCP-H2 é empregado do que quando RED é utilizado. Com carga de 0.4, o *goodput* obtido pelo HSTCP-H2 é 40% maior do que os valores obtidos por RED. Com carga de 0.9, esta diferença pode ser da ordem de 100%. Estes resultados evidenciam as vantagens de usar o HSTCP-H2. Os valores de *goodput* apresentados pelo HSTCP-H2 são resultados direto do objetivo de projeto de “prevenir a subutilização do enlace”.

O *Round Trip Time* (RTT) determina o atraso sofrido pelos pacotes. Valores elevados de RTT tornam inviáveis aplicações sensíveis ao atraso e a sua variação (*jitter*), tais como as aplicações multimídia. O HSTCP-H2 obtém os menores valores de RTT médio (Figura 2(b)). Estes resultados são consequência do critério “minimização do *jitter*” adotado como um objetivo de projeto para o HSTCP-H2. Desta forma, a utilização do HSTCP-H2 é benéfica à aplicações sensíveis ao atraso e ao *jitter*.

Além de *goodput* e RTT, as métricas tamanho médio da fila, vazão média, tamanho médio da janela de congestionamento, *Retransmission Timeout* (RTO), latência da conexão e número médio de conexões ativas foram obtidas e apresentadas de forma detalhada em [Santi 2008]. A influência das políticas de AQM na justiça intraprotocolo do HSTCP também foi investigada [Santi et al. 2009].

Diante de congestionamento leve a moderado, o número médio de retransmissões devido ao esgotamento do temporizador (RTO) gerado pelo HSTCP-H2 chega a ser 78% menor do que o de RED. Sob congestionamento pesado, o HSTCP-H2 produz um número maior de RTO's pois as filas que produz são maiores que as produzidas por RED. No entanto, em decorrência dos elevados valores de *throughput*, o HSTCP-H2 continua a obter valores de *goodput* significativamente superiores (Figura 2(a)). As janelas produzidas por HSTCP-H2 chegam a ser três vezes maior do que as de RED, e consequentemente o HSTCP-H2 gera, também, maiores vazões.

Os resultados obtidos para a topologia com múltiplos enlaces gargalo reforçam os resultados apresentados para topologia com enlace gargalo único. Por exemplo, o *goodput* obtido pelo HSTCP-H2 fica entre 17% e 128% maior do que os valores de RED. Para a métrica de RTO, o HSTCP-H2 apresenta valores entre 19% e 70% menores do que RED. Esta diferença para o número de RTO's é justificado pela habilidade do HSTCP-H2 em adaptar-se a complexidade da topologia enquanto RED, com parâmetros pré-definidos, tem seu desempenho severamente degradado. Esta valores evidenciam a eficácia do HSTCP-H2 independentemente da variação do ambiente utilizado [Santi 2008].

## 5. Conclusão

A dissertação [Santi 2008], descrita no presente artigo, introduz o controlador ótimo HSTCP-H2 para redes de alta velocidade que utilizam o protocolo de transporte HSTCP. O diferencial deste trabalho é a introdução dos objetivos de desempenho na especificação do projeto do controlador, utilizando, para tal, Teoria de Controle Ótimo ao invés de controle clássico, como na maioria dos trabalhos existentes na literatura [Sonkoly et al. 2005]. O algoritmo obtido é simples e facilmente implementável.

Resultados derivados através de simulação mostram que o *goodput* por conexão do HSTCP-H2 é significativamente superior ao de RED, refletindo o objetivo do projeto do controlador de “prevenção da subutilização do enlace”. Além disso, RED, com suas limitações de ajustes apresenta desempenho muito aquém do esperado.

Em resumo, pode-se dizer que o uso de controladores ótimos no controle de congestionamento em redes com produto banda-atraso elevado e a demonstração de sua eficiência constituem a contribuição da dissertação [Santi 2008].

Sugere-se, como trabalho futuro, a investigação da influência de políticas de AQM na escalabilidade, na convergência e na estabilidade dos mecanismos de controle de congestionamento TCP em redes com produto banda-atraso elevado. Indica-se, também, a derivação de controladores ótimos para outras variantes do TCP para redes com PBA elevado e uma comparação destes diferentes sistemas TCP/AQM.

## Referências

- Chen, S. and Bensaou, B. (2007). Can high-speed networks survive with droptail queues management? In *Proc of IJCTN*, volume 51, pages 1763–1776.
- Floyd, S. (1997). Red: Discussions of setting parameters. *Floyd's Setting Parameters Suggestion*. On-line available: <http://www.icir.org/floyd/REDparameters.txt>.
- Floyd, S. (2002). Modifying tcp's congestion control for high speeds. On-line available: <http://www.icir.org/floyd/notes.html>.
- Fomenkov, M., Keys, K., Moore, D., and Claffy, K. (2004). Longitudinal study of internet traffic in 1998–2003. In *Proc WISICT'04*, volume 58, pages 1–6.
- Huang, X., Lin, C., Ren, F., and Yin, H. (2004). Highspeed tcp modeling and analysis. *Proc of IEEE Broadnets'04*.
- Katabi, D., Handley, M., and Rohrs, C. (2002). Congestion control for high bandwidth-delay product networks. *ACM SIGCOMM*, 32:89–102.
- Oliveira, D. P. F. M. C. and Geromel, J. C. (2009). Lmi solver user's guide. [Online]. Available: <http://www.dt.fee.unicamp.br/~mauricio/lmisol/userguide.ps.gz>.
- Oliveira, M. C. and Geromel, J. C. (2004). Synthesis of non-rational controllers for linear delay systems. *Proc. of Automatica*, 40(2):171–188.
- Park, P. (1999). A delay-dependent stability criterion for systems with uncertain time-invariant delays. *Proc of IEEE transactions on automatic control*, 44(2):876–877.
- Santi, J. (2008). Gerenciamento ativo de filas para o protocolo “high speed transmission control protocol” em redes com produto banda-atraso elevado. Master's thesis, IC - Unicamp. <http://www.lrc.ic.unicamp.br/~jsanti/santi-dissertacao-08.pdf>.
- Santi, J., Fonseca, N. L. S., and Lima, M. (2007). Projeto de controladores ótimos para redes com produto banda-atraso elevado. *Proc. SBRC'07*, pages 899–912.
- Santi, J., Fonseca, N. L. S., and Lima, M. (2008a). Active queue management controller for the high speed tcp protocol. *Proc. of IEEE ICC'08*, pages 2261–2266.
- Santi, J., Fonseca, N. L. S., and Lima, M. (2008b). Avaliação de desempenho de gerenciamento ativo de filas para redes de alta velocidade. *Proc. of SBRC'08*, pages 1–14.
- Santi, J., Fonseca, N. L. S., and Lima, M. (2009). High speed networks: a new approach for congestion control. *Computer Networks - Elsevier*. Submetido.
- Sonkoly, B., Trinh, T. A., and Molnár, S. (2005). Understanding highspeed tcp: A control-theoretic perspective. *Proc. of IASTED*, pages 74–80.