

Avaliação de Desempenho de Gerenciamento Ativo de Filas para Redes de Alta Velocidade

Juliana de Santi¹, Nelson L. S. da Fonseca¹, Michele M. A. E. Lima²

¹Instituto de Computação – Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP)
Caixa Postal 6167 – 13084-971 – Campinas – SP – Brazil

²Departamento de Ciência da Computação
Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), – Brazil

juliana.santi@students.ic.unicamp.br, nfonseca@ic.unicamp.br,
michelelima@ufpe.br

***Abstract.** This paper evaluates the performance of the optimal AQM controller HSTCP-H2 designed for networks which employ the HSTCP protocol. Simulation results indicate that the HSTCP-H2 controller produces much higher goodput per connection and utilization than the RED controller under FTP and under WEB traffic.*

***Resumo.** Este trabalho apresenta a avaliação de desempenho do controlador HSTCP-H2, um controlador AQM ótimo para redes que utilizam o protocolo HSTCP como protocolo de transporte. Resultados, obtidos através de simulações, mostram as vantagens em utilizar o HSTCP-H2 em relação ao controlador RED em redes com grande disponibilidade de banda, tanto sob tráfego FTP quanto sob tráfego WEB. O controlador HSTCP-H2 é capaz de maximizar a utilização da banda disponível, enquanto mantém um baixo número de perdas e baixos valores de RTT.*

1. Introdução

Em redes com produto banda-atraso elevado, para se utilizar eficientemente os recursos disponíveis é necessário que o tamanho da janela de congestionamento tenha um valor elevado, dado que este é proporcional ao produto banda-atraso. A abordagem do mecanismo de controle de congestionamento do *Transmission Control Protocol* (TCP Reno) é demasiadamente conservadora, o que restringe a velocidade do crescimento da janela e, conseqüentemente, impede a utilização eficiente da grande quantidade de banda disponível. Além disso, a redução do tamanho da janela pela metade, em resposta a um evento de perda, é excessivamente drástica, o que prolonga o período de tempo necessário para atingir a utilização ideal novamente. Para superar estas dificuldades, diversas variações do protocolo TCP para redes de alta velocidade foram propostos recentemente.

O protocolo *High Speed TCP* (HSTCP) [Floyd, S., Ratnasamy, S. 2002], uma das primeiras variantes do TCP, opera em duas fases diferentes. Nas situações em que a taxa de eventos de perdas é maior do que 10^{-3} , o desempenho do TCP Reno é satisfatório e, portanto, o mecanismo de ajuste do HSTCP procede da mesma forma que o do TCP Reno. Por outro lado, quando perdas são eventos raros, o HSTCP emprega uma função

de crescimento da janela mais agressiva permitindo, assim, que a utilização da banda disponível seja escalável. Os parâmetros do HSTCP são ajustados de forma a estabelecer um relacionamento linear em escala log-log entre a taxa de envio e os eventos de congestionamento.

Embora sejam indispensáveis na prevenção de colapsos de congestionamento, os mecanismos de controle de congestionamento do TCP Reno e das variantes do TCP não são suficientes para prevenir o congestionamento, devido ao controle limitado que as fontes TCP exercem sobre o tráfego agregado na presença de fluxos que não estão sujeitos a controle de congestionamento. O desempenho do mecanismo de controle de congestionamento do TCP é dependente de outros mecanismos, tais como políticas de Gerenciamento Ativo de Filas (*Active Queue Management* - AQM). As políticas de AQM, implementadas nos roteadores, são responsáveis por notificar o congestionamento incipiente aos emissores TCPs através do descarte/marcação de pacotes. Ao serem notificados, os emissores TCP reduzem a taxa de transmissão antes que a fila transborde e ocorra um grande número de perdas.

Random Early Detection (RED) [Floyd and Jacobson 1993] é a política recomendada pela *Internet Engineering Task Force* (IETF) para ser implementada na Internet. RED estima o tamanho médio da fila (Q_{avg}) e compara com dois limiares: min_{th} e max_{th} . Quando o tamanho médio da fila é menor que min_{th} nenhum pacote é descartado/marcado. Quando Q_{avg} está entre min_{th} e max_{th} , tenta-se prevenir o congestionamento. Marca-se/descarta-se cada pacote que chega com uma certa probabilidade p , que aumenta linearmente com o tamanho médio da fila. No caso em que Q_{avg} é maior que max_{th} , a fase é de controle de congestionamento. Nesta fase, todos os pacotes que chegam a fila são descartados.

O grande desafio ao utilizar RED é ajustar os seus parâmetros, pois quando os valores dos limiares não são corretamente definidos, o desempenho de RED degrada-se, podendo ser pior do que o da tradicional política *drop tail*. Para superar estas dificuldades, numerosos estudos baseados em heurísticas tem sido conduzidos [Floyd and Jacobson 1993, Floyd, S. 1997, Floyd, S. 2000]. No entanto, estes estudos não asseguram que um ponto de equilíbrio seja alcançado, nem garantem estabilidade do tamanho da fila. Pesquisas tem sidos conduzidas na tentativa de derivar configurações para RED de uma maneira mais sistemática [Hollot et al. 2002, Firoiu and Borden 2000]. Uma destas abordagens usa Teoria de Controle para projetar políticas de AQM que assegurem estabilidade em torno do ponto de equilíbrio [Lima et al. 2004, Augusto et al. 2007]. Políticas baseadas em Teoria de Controle consideram a natureza intrínscica de retroalimentação do congestionamento na rede.

Em [Santi et al. 2007], apresentou-se a derivação de um controlador AQM baseado em Teoria de Controle Ótimo. A vantagem no uso de tal teoria é que o comportamento desejado para o sistema é formulado em termos da minimização de uma função de custo. O uso de uma função objetivo permite a especificação exata dos objetivos de controle, que uma vez determinados são satisfeitos de forma ótima. Realizou-se um estudo sobre quais objetivos adotados levam a um controlador com o melhor desempenho possível. Concluiu-se, através de resultados de simulação, que o melhor desempenho possível para redes com produto banda-atraso elevado é alcançado com o uso conjunto dos objetivos “prevenir a subutilização do enlace” e “minimizar a variação do *jitter*”. Derivou-se um

controlador com estes objetivos denominado HSTCP-H2.

O presente artigo avalia o desempenho do controlador HSTCP-H2, introduzido em [Santi et al. 2007], e compara-o ao desempenho da política de AQM padrão RED. Resultados derivados via simulação indicam que a capacidade do HSTCP-H2 em utilizar a banda passante disponível é consideravelmente maior do que a de RED, enquanto produz um baixo número de perdas, e mantém os valores de *Round Trip Time* (RTT) baixos e com pouca variação. O diferencial deste artigo em relação a [Santi et al. 2007] é, portanto, a avaliação dos benefícios de se utilizar controlador AQM baseado em Teoria de Controle Ótimo quando comparado ao uso do controlador RED, padronizado pelo IETF.

Estudos realizados em [Barman et al. 2004] [Sonkoly et al. 2005] comparam o desempenho de *drop tail* e controladores semelhantes a RED quando utilizados em conjunto com o protocolo HSTCP. Em [Barman et al. 2004], avalia-se a influência do tamanho do *buffer*, quando o HSTCP é utilizado em conjunto com RED e com *drop tail*. Em [Sonkoly et al. 2005] estuda-se a influência destas no comportamento da fila. Em [Long Chengnian and Xinping 2006], foi avaliada a justiça de RTT quando diferentes políticas de AQM são utilizadas em conjunto com o HSTCP. A principal diferença entre os trabalhos citados e o presente artigo, é a utilização de um controlador ótimo. Além disso, no presente artigo são utilizadas tanto métricas relacionadas ao enlace, como métricas relacionadas às conexões ativas. Um conjunto de métricas para avaliação de desempenho mais abrangente, possibilita, enfatizar o potencial do HSTCP-H2 como política de AQM preferencial.

Este trabalho é organizado conforme segue. Na Seção 2, apresenta-se o protocolo *High Speed TCP*. Na Seção 3, apresenta-se o modelo usado no projeto do sistema de AQM proposto, e na Seção 4, introduz-se o projeto do controlador HSTCP-H2. Na Seção 5, compara-se o desempenho do HSTCP-H2 com o desempenho de RED. Finalmente, na Seção 6 conclui-se o trabalho.

2. High Speed TCP

No protocolo *High Speed TCP*, quando o tamanho da janela de congestionamento é menor que um limiar (usualmente ajustado para 38 *Maximum Segment Size* - MSS), o mecanismo de controle de congestionamento do TCP Reno é utilizado. Caso contrário, aumenta-se a janela de congestionamento por uma função mais agressiva e reduz-se a janela de forma 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.

Os ajustes dos parâmetros do HSTCP seguem a clássica abordagem *Additive Increase Multiplicative Decrease* (AIMD), mas com diferentes valores de crescimento e redução para a janela de congestionamento. A dinâmica da janela de congestionamento do HSTCP é dado por:

$$ACK : W = W + \frac{a}{W}; \quad DROP : W = W - b * W \quad (1)$$

onde os parâmetros de crescimento aditivo (a) e redução multiplicativa (b) são calculados em função do tamanho corrente da janela de congestionamento e são determinados por [Floyd, S., Ratnasamy, S. 2002][Huang et al. 2004]:

$$b = -0.12 \log(W) + 0.69; \quad a = 0.16 W^{0.8} \frac{b}{2-b} \quad (2)$$

3. Modelo Dinâmico do HSTCP/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], os quais são dados, respectivamente, por:

$$\dot{W}(t) = \frac{a(t)}{R(t)} - b(t)W(t) \frac{W(t - R(t))}{R(t - R(t))} p(t - R(t)) \quad (3)$$

$$\dot{q}(t) = \frac{N(t)W(t)}{R(t)} - C + \omega_q(t) \quad (4)$$

$$R(t) = \frac{q(t)}{C(t)} + T_p \quad (5)$$

onde: $W(t)$ é o tamanho médio da janela de congestionamento em pacotes; $q(t)$ é o tamanho da fila em pacotes; $R(t)$ é o 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; T_p é o tempo de propagação em segundos.

A partir destas equações, deriva-se o ponto de equilíbrio desejado e lineariza-se o sistema de equações diferenciais para então projetar-se o controlador, como descrito em [Santi et al. 2007].

4. Projeto de um Controlador Ótimo para Gerenciamento Ativo de Filas

Nesta seção, o sistema de equações linearizado é representado como um sistema linear com atraso contínuo no tempo, na forma de estado de espaço. Utiliza-se uma abordagem não-racional para se derivar o controlador ótimo HSTCP-H2. A síntese do controlador segue a abordagem introduzida em [Oliveira and Geromel 2004] e [Lima et al. 2004].

O sistema dinâmico do HSTCP linearizado pode ser analisado como uma função dos parâmetros da rede, número de fluxos TCP, N_0 , tempo de viagem da conexão (RTT), R_0 , capacidade do enlace, C_0 , e em termos da natureza intrínseca de retroalimentação do sistema [Sonkoly et al. 2005]. A função do controlador AQM, $C(s)$, é marcar/descartar pacotes com uma probabilidade p , usando estimativas do tamanho da fila q . O controlador deve, também, estabilizar a planta do sistema, definida pela função de transferência $P(s)$, a qual é irracional em s e relaciona os efeitos da probabilidade de descarte/marcação sobre o tamanho da fila.

O sistema linear pode ser expresso na forma de estado de espaço pela seguinte equação:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= A_0x(t) + A_1x(t - R_0) + B_uU(t) \\ z(t) &= C_{z0}x(t) + C_{z1}x(t - R_0) + D_{zu}u(t) \\ y(t) &= C_yx(t - R_0) + D_{yw}w(t) \end{aligned} \quad (6)$$

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

Considere que o sistema descrito em (6) é conectado ao controlador:

$$\hat{x}(t) = \hat{A}_0\hat{x}(t) + \hat{A}_1\hat{x}(t - R_0) + \hat{B}y(t) \quad u(t) = \hat{C}_0\hat{x}(t) + \hat{C}_1\hat{x}(t - R_0) + \hat{D}y(t) \quad (7)$$

Este controlador pode ser descrito no domínio da frequência por uma função de transferência não-racional:

$$C_{HSTCP-H2}(s) = (\hat{C}_0 + \hat{C}_1 e^{-sR_0})(sI - \hat{A}_0 - \hat{A}_1 e^{-sR_0})^{-1} \hat{B} + \hat{D} \quad (8)$$

O controlador (7) foi cuidadosamente projetado para reproduzir a estrutura da planta do sistema (6). O objetivo é determinar as matrizes do controlador (7) que estabilizam (6) 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 assegurar taxa máxima de transmissão enquanto minimiza o tamanho da fila sujeito as condições da rede, prevenindo a perda de pacotes.

Em [Santi et al. 2007], foram comparados os controladores ótimos derivados considerando-se diferentes objetivos de desempenho. Por meio de simulações, constatou-se que o objetivo de “prevenção de subutilização do enlace e minimização do *jitter*” é o que apresenta melhor desempenho para redes com produto banda-atraso elevado. Em (6), C_z representa o objetivo do projeto de prevenir a subutilização do enlace enquanto minimiza o tamanho da fila e sua variação.

$$C_z = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ \frac{N_0}{R_0} & \frac{-1}{R_0} \end{bmatrix}$$

Na matriz C_z , a primeira linha está relacionada ao tamanho da fila e expressa o objetivo de minimizar a diferença entre q medida e q_0 . A segunda linha representa o objetivo de minimizar a variação da fila.

Definido os objetivos de desempenho, o próximo passo é ligar o sistema (6) ao controlador (7). Seja $\bar{x}(t)$ vetor de estado aumentado, o qual contém o vetor de estado $x(t)$ e o vetor de estado do controlador $\hat{x}(t)$, $\bar{x}(t)^{-1} = \begin{bmatrix} x(t) \\ \hat{x}(t) \end{bmatrix}$.

A conexão do sistema (6) com o controlador (7) leva ao sistema linear com atraso:

$$\dot{\bar{x}}(t) = \mathcal{A}_0 \bar{x}(t) + \mathcal{A}_1 \bar{x}(t - R_0) + \mathcal{B}w(t) \quad z(t) = C_0 \bar{x}(t) + C_1 \bar{x}(t - R_0) + \mathcal{D}w(t) \quad (9)$$

Após comprovar a estabilidade do sistema (9), através do Teorema 4 – b de [Oliveira and Geromel 2004], os parâmetros do controlador (7) foram determinados. Na determinação dos parâmetros, a solução obtida possibilitou o cancelamento dos termos com atraso do sistema levando a um controlador racional. O cancelamento do atraso, quando possível, é a solução ótima para o problema de minimização da norma H_2 [Oliveira and Geromel 2004]. Assim sendo, obteve-se o Algoritmo (1) para a política de AQM HSTCP-H2 [Santi et al. 2007].

5. Avaliação de Desempenho

O controlador HSTCP-H2 é comparado com o de RED, a política de AQM padronizada pelo IETF. Para verificar o desempenho do controlador HSTCP-H2, o Algoritmo 1 foi implementado no simulador NS [VINTproject 2008] e o ponto de equilíbrio apresentado na Seção 3 foi utilizado. A frequência de amostragem utilizada foi 8333 Hz, e os coeficientes para o controlador foram $a = 7.361e^{-10}$, $b = 3.06e^{-13}$, $c = 7.358e^{-10}$, $d = 0.08609$ e $e = 0.9131$. Os parâmetros de RED foram ajustados da seguinte forma: max_{th} é 20% do

Algorithm 1 Cálculo da probabilidade de descarte/marcação para o HSTCP-H2

- 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: $q_{old} \leftarrow q_0$

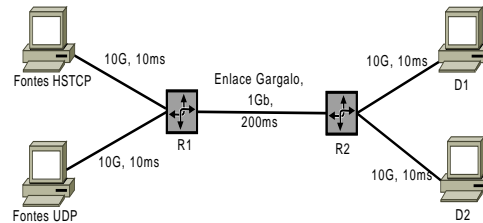


Figura 1. Topologia utilizada nos experimentos com enlace gargalo único

produto banda-atraso, ou seja, 3333 pacotes; $min_{th} = \frac{1}{3} max_{th}$; $max_p = 0.1$; $w_q = 0.002$ [Floyd, S. 1997]. Foi também habilitada a opção *gentle_* de RED [Floyd, S. 2000], na qual a probabilidade de descarte/marcação varia de max_p até 1 quando o tamanho médio da fila varia de max_{th} até duas vezes o valor de max_{th} .

As simulações foram realizadas usando o simulador ns2.29. Para os experimentos foi considerada a topologia *Dum-Bell* apresentada na Figura 1. O enlace entre os nós R_1 e R_2 é o enlace gargalo. A capacidade e tempo de propagação dos enlaces estão especificadas na Figura 1. O tráfego principal (FTP ou WEB) é gerado nas fontes HSTCP para o destino D_1 . A percentagem de tráfego principal corresponde a 80% do tráfego gerado. Este valor foi utilizado levando-se em consideração as medidas apresentadas em [Fomenkov et al. 2004], as quais demonstram que $(83 \pm 11)\%$ dos *bytes* que atravessam a Internet são do tipo TCP. Para verificar a eficiência do controlador HSTCP-H2 na presença de ruído, foram incluídos 20% de tráfego gerado por fluxos não-adaptativos, composto por tráfego CBR/UDP. O tráfego UDP foi gerado e finalizado em diferentes intervalos de tempo, das fontes *UDP* para o destino D_2 .

A variação TCP utilizada foi o *High Speed TCP*. O tamanho dos segmentos gerados foi de 1500 *bytes*, ou seja, o padrão *Ethernet*. O tamanho do *buffer* é de 3333 pacotes, equivalente a 20% do produto banda-atraso. Estudos realizados em [Barman et al. 2004] demonstram que tamanho de *buffer* equivalente a 20% do produto banda-atraso levam a uma utilização superior a 98% da capacidade de enlace pelo HSTCP.

O gerador de tráfego *TrafficGen* [Cardoso and de Rezende 2002], é utilizado para gerar cargas específicas. Variou-se a carga de 0.4 até 1.0, de modo a verificar o desempenho do controlador sob diferentes níveis de congestionamento. O tráfego FTP é gerado usando uma distribuição exponencial com média de 512 *KBytes*. O tráfego WEB é gerado usando uma distribuição híbrida Lognormal/Pareto. O corpo da distribuição corresponde a uma área de 0.88 e é modelado por uma distribuição Lognormal com média de 7247 *bytes*, já a cauda é modelada por uma distribuição Pareto com média de 10558 *bytes* [Barford et al. 1998].

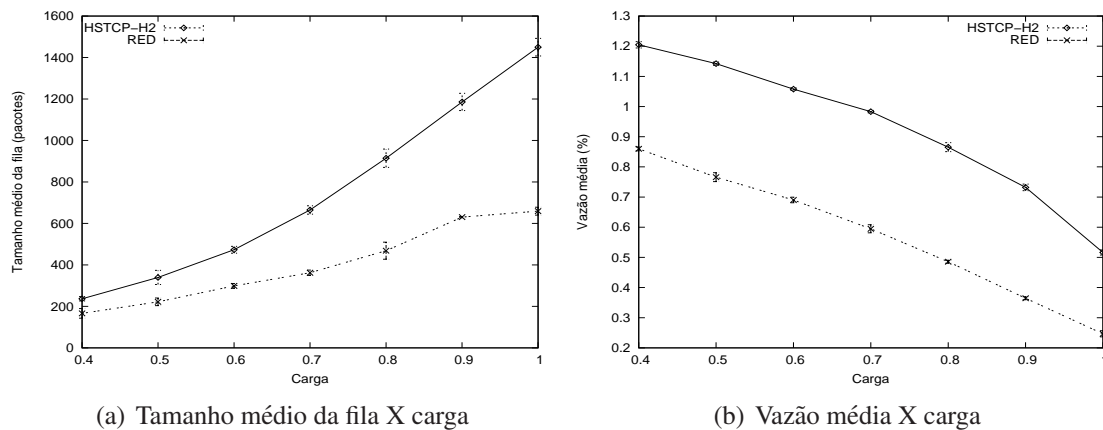


Figura 2. Tráfego FTP

A janela do receptor foi ajustada para um valor elevado (100000 pacotes), de forma que o crescimento da janela do emissor fosse governado somente pelas condições da rede e não pelo receptor.

Para derivar os valores mostrados nos gráficos utilizou-se o método de replicação independente com intervalo de confiança de 95%.

5.1. Experimentos Utilizando tráfego de Longa Duração

Na Figura 2(a), apresenta-se o tamanho médio da fila em função da carga. Conforme o esperado, o aumento do congestionamento no enlace leva ao crescimento do tamanho da fila. A fila do HSTCP-H2 é no mínimo 42% maior do que a fila de RED, chegando a ser quase três vezes maior com carga de 1.0. Filas maiores significam que um volume maior de dados foi transferido pela rede e, conseqüentemente, a utilização da banda passante é, também, maior. Desta forma, o HSTCP-H2 apresenta maior utilização dos recursos disponíveis para todo o intervalo de cargas testado. É importante ressaltar que um dos objetivos de projeto do controlador é, exatamente, “prevenir a subutilização do enlace”, ficando, assim, evidente a eficácia do controlador em atingir o objetivo almejado. Além de apresentar tamanho de fila menor, é possível verificar ainda, que a fila de RED cresce lentamente, sendo praticamente constante para cargas entre 0.9 e 1.0, demonstrando, assim, a pouca flexibilidade desta política em ajustar-se rapidamente diante de flutuações do nível de congestionamento.

A Figura 2(b) apresenta a percentagem média de banda passante obtida, ou vazão, por conexão ativa em função da carga. A vazão obtida pelo HSTCP-H2 é consideravelmente maior do que a de RED. Esta diferença torna-se mais acentuada a medida que o congestionamento se intensifica. A vazão do HSTCP-H2 é no mínimo 40% maior e no máximo 109% maior do que a de RED para cargas entre 0.4 e 1.0, respectivamente. Estes valores justificam o tamanho médio da fila mostrado anteriormente, ou seja, confirmam a maior ocupação do enlace pelo HSTCP-H2. A vazão reflete a quantidade de dados que a janela de congestionamento injeta na rede. A Figura 3(a) mostra o tamanho médio da janela de congestionamento por conexão ativa, dada em unidades de MSS. O tamanho de janela obtida pelo HSTCP-H2 é consideravelmente maior do que o tamanho da janela de RED. Com carga de 0.4 a janela do HSTCP-H2 é 107% maior que a de RED, chegando a ser três vezes maior com carga de 0.9. A diferença entre os valores de janela do

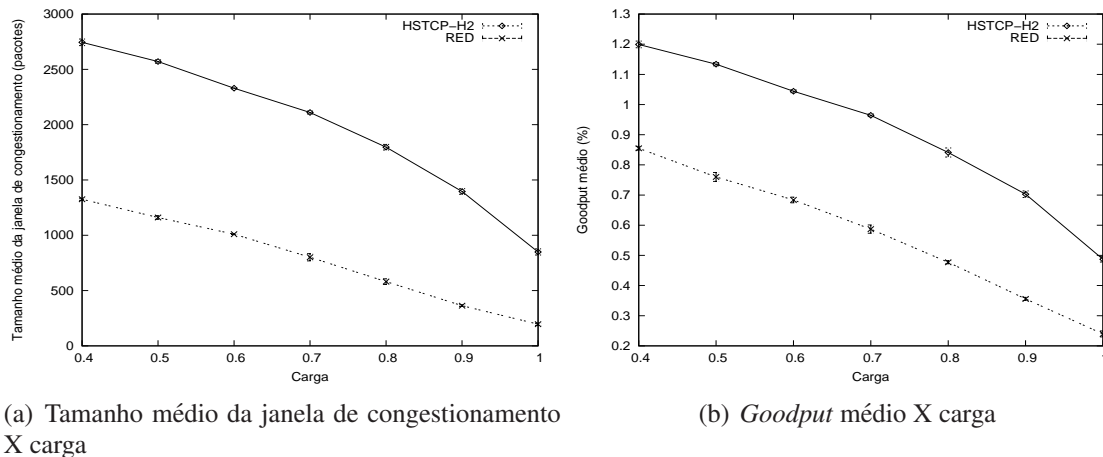


Figura 3. Tráfego FTP

HSTCP-H2 e de RED são, novamente, justificados pelas características das políticas de AQM empregadas. Para alcançar o objetivo de “prevenir a subutilização do enlace”, o HSTCP-H2 deve sinalizar o descarte/marcação aos emissores HSTCP de modo que estes possam aumentar a sua janela de congestionamento e, conseqüentemente, maximizar a sua taxa de transmissão. Por outro lado, o RED, com suas limitações de ajustes diante de variações das condições do meio, não consegue realizar uma sinalização eficiente aos emissores HSTCP, e, conseqüentemente, as janelas não crescem tanto quanto poderiam.

É possível observar ainda os elevados valores de janela de congestionamento, que chegam a ter 2744 segmentos, o que é uma consequência direta da utilização do TCP variante HSTCP. O protocolo HSTCP foi projetado para superar umas das principais dificuldades apresentadas pelo TCP Reno, ou seja, ser capaz de alcançar valores elevados para a janela de congestionamento em ambientes com produto banda-atraso elevado, uma vez que somente desta forma a banda passante disponível é eficientemente utilizada. Estes resultados comprovam, portanto, a eficiência do HSTCP em ajustar a janela congestionamento em ambientes com produto banda-atraso elevado.

Uma métrica de grande importância ao considerar mecanismos de controle é o *goodput*, o qual permite verificar a eficiência da utilização da banda passante. O *goodput* resulta do tamanho da janela de congestionamento e da quantidade de perdas no meio, ou seja, quanto maior a janela de congestionamento e quanto menor a quantidade de perdas, maior é o *goodput* ou melhor é a utilização da banda passante. Com o tamanho médio de janela de congestionamento obtida e os baixos valores de perda (Figura 4(a)), o *goodput* por conexão ativa (Figura 3(b)) é muito maior quando o controlador HSTCP-H2 é usado do que quando RED é utilizado. O *goodput* por conexão obtido pelo controlador HSTCP-H2 é 40% maior do que o de RED com carga de 0.4. Com carga de 0.9 tal diferença pode ser da ordem de 100%. Estes resultados tornam evidente a vantagem em empregar HSTCP-H2 para conexões individuais. Os valores de *goodput* evidenciam que o HSTCP-H2 é capaz de capitalizar uma maior utilização do enlace e maiores tamanhos de fila produzindo maiores valores de vazão útil por conexão.

A Figura 4(a) apresenta o número médio de retransmissões devido ao esgotamento do temporizador (*Retransmission Timeout* - RTO) por conexão ativa. Diante de congestio-

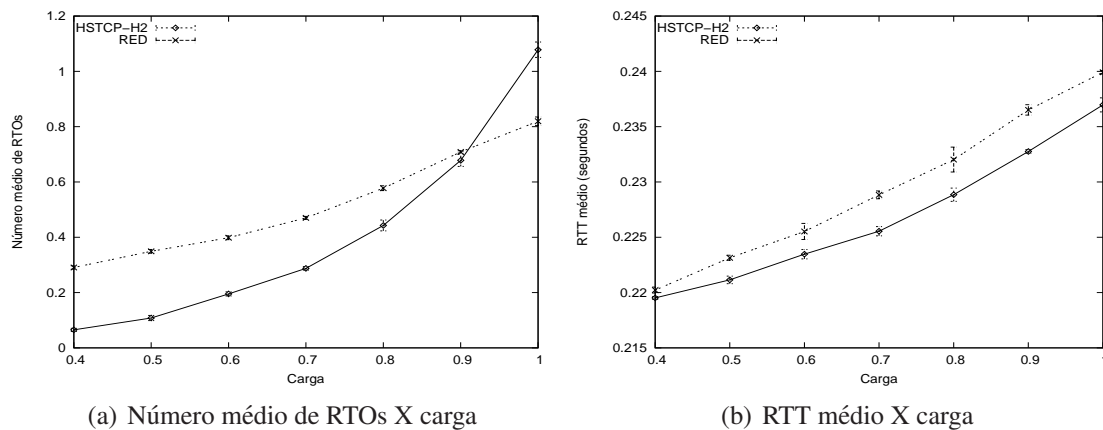


Figura 4. Tráfego FTP

namento leve à moderado, o HSTCP-H2 apresenta número de RTOs menor do que RED. Para carga de 0.4, o número de RTOs apresentado pelo HSTCP-H2 é 78% menor do que os valores de RED. Conforme o congestionamento se intensifica, a diferença entre o HSTCP-H2 e RED diminui devido a perda de um grande número de pacotes. Entretanto, com carga de 1.0, a longa fila produzida pelo HSTCP-H2 leva a um número de perdas maior do que RED. O tamanho da fila de RED (Figura 2(a)) quando o congestionamento está na sua intensidade máxima é praticamente constante, enquanto que o tamanho da fila do HSTCP-H2 continua a crescer. Como se pode observar na Figura 3(b), devido a alta taxa de vazão, o HSTCP-H2 continua a obter valores *goodput* elevados.

Embora o HSTCP-H2 gere fila maior que a do RED, ele ainda mantém baixos valores para o RTT médio (Figura 4(b)). Pode-se observar que, independente do nível de congestionamento na rede, o HSTCP-H2 mantém o RTT médio menor do que o de RED e com diferença praticamente constante. Tal resultado é uma consequência do critério de “minimização de *jitter*” adotado como um objetivo de projeto para o controlador HSTCP-H2. Este resultado reforça a importância da utilização de controladores ótimos, os quais permitem a definição de objetivos específicos no projeto de AQM.

Com redução do número de RTOs, aumenta-se a vazão de dados e o tempo de vida da conexão é reduzido, ou seja, a latência na transferência dos arquivos é reduzida. Na Figura 5(a), pode-se observar uma redução significativa da latência do HSTCP-H2, a qual é no mínimo 49% menor do que RED sob carga 0.4, e no máximo 67% menor sob carga 0.9. Com latência menor, a utilização dos recursos é otimizada, permitindo que um número maior de conexões ocupem o enlace quando HSTCP-H2 é a política de AQM empregada. Na Figura 5(b), apresenta-se o número médio de conexões em função da carga. Sob cargas leves, a diferença entre o número de conexões obtidas pelo HSTCP-H2 e por RED é pequena. No entanto, quando o nível de congestionamento eleva-se a diferença passa a ser mais acentuada. Para carga 1.0, as simulações com HSTCP-H2 apresentam aproximadamente 630 conexões a mais do que quando RED está em uso.

Os resultados obtidos demonstram o desempenho do controlador ótimo HSTCP-H2 em relação a política de AQM padrão RED quando o tráfego é do tipo FTP. O HSTCP-H2 mostra-se eficiente tanto para a métrica do tamanho de fila, que considera a influência da política de AQM no tráfego agregado, quanto para as demais métricas que consideram

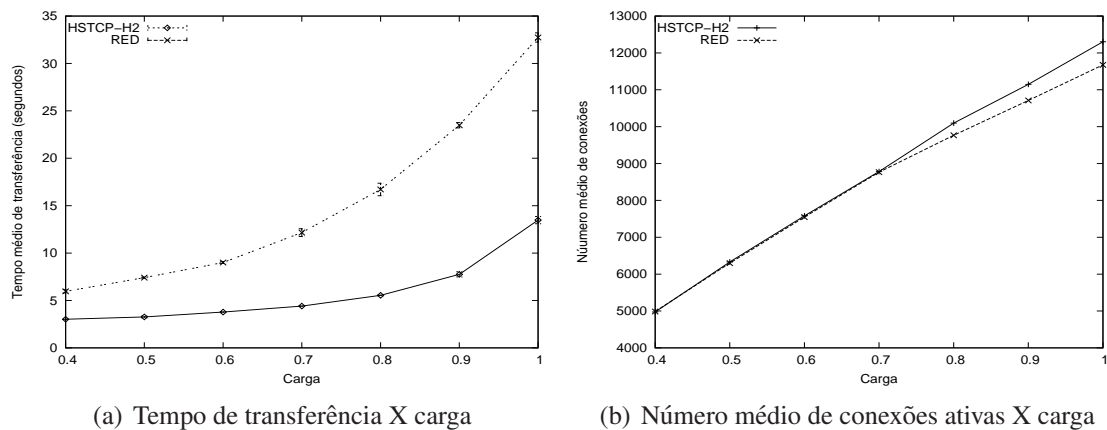


Figura 5. Tráfego FTP

a influência da política de AQM sobre as conexões ativas. Desta forma, pode-se verificar que o HSTCP-H2 é uma política de AQM que apresenta utilização de banda consideravelmente superior a produzida por RED; resultado este, que é consequência das altas taxas de vazão e elevados valores de janela de congestionamento obtidas pelo HSTCP-H2. Além disso, os ajustes do HSTCP-H2 levam a um número de RTOs inferior ao número de RTOs de RED, exceto quando o congestionamento está na sua intensidade máxima, esta é uma consequência dos valores elevados do tamanho de fila produzida por HSTCP-H2 enquanto o RED mantém o tamanho da fila aproximadamente constante. O HSTCP-H2 apresenta, também, *goodput* significativamente maior do que RED, enquanto mantém baixos valores de RTT.

5.2. Experimentos Utilizando tráfego de Curta Duração

Na Figura 6(a) é apresentado o tamanho médio da fila em função da carga. É possível observar que quando HSTCP-H2 é a política de AQM utilizada o tamanho da fila aumenta consideravelmente com o aumento da carga, ao passo que a fila gerenciada por RED cresce lentamente. Isto demonstra que a capacidade do HSTCP-H2 em utilizar a banda passante é significativamente maior do que RED. Comparando-se o tamanho de fila do HSTCP-H2 sob tráfego WEB ao tamanho da fila sob tráfego FTP (Figura 2(a)), constata-se que os valores de fila sob tráfego de longa duração são maiores que os produzidos quando sob tráfego de curta duração, o que era esperado dado as características do tráfego WEB em produzir rajadas menores e, portanto, apresentar menor ocupação da fila.

As Figuras 6(b) e 7(a) mostram, respectivamente, a vazão média e o tamanho médio da janela de congestionamento obtidos por conexão ativa em função da carga. Assim como acontece com tráfego FTP, para tráfego WEB o HSTCP-H2 apresenta maior percentagem de vazão do que RED. A vazão obtida pelo HSTCP-H2 sob carga de 0.4 e 0.8 é, respectivamente, no mínimo 5% maior e no máximo 19% maior do que RED. A vazão determina a utilização do enlace. Um dos objetivos para HSTCP-H2 é exatamente minimizar a subutilização do enlace, ficando comprovada a sua eficiência quando comparada a RED. Mais uma vez, este resultado é consequência dos maiores valores de janela (Figura 7(a)), obtidos quando o HSTCP-H2 é utilizado. O tamanho da janela para HSTCP-H2 é significativamente superior a produzida por RED. A janela para HSTCP-H2 é no mínimo 22% maior e no máximo 53% maior do que RED para cargas de 0.4 e 1.0,

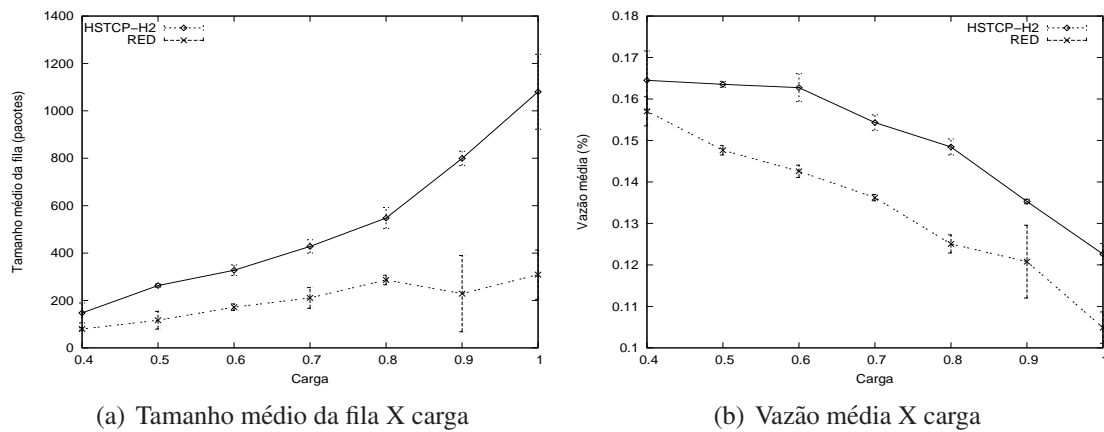


Figura 6. Tráfego WEB

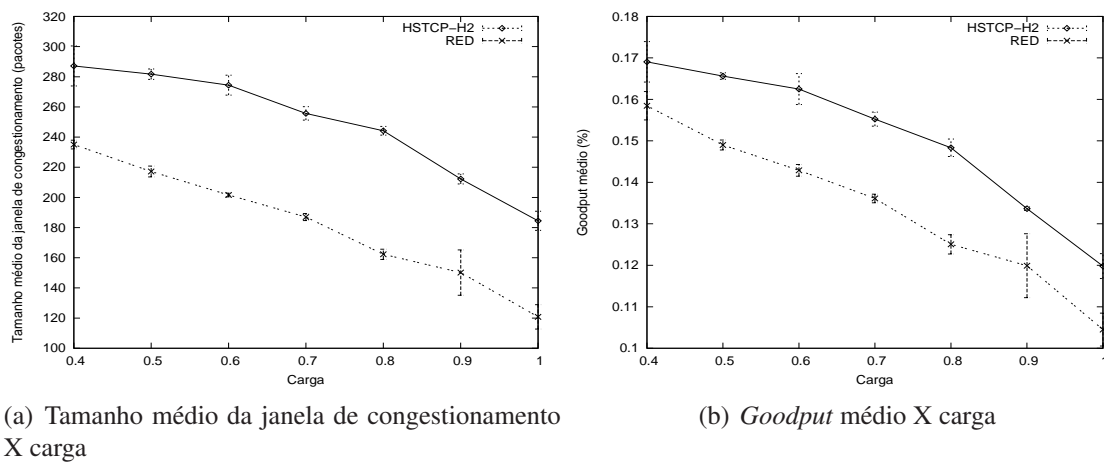


Figura 7. Tráfego WEB

respectivamente. Comparando-se os valores de janela de congestionamento para tráfego WEB e tráfego FTP, verifica-se que os valores para tráfego WEB são menores, o que acontece devido ao fato das conexões de curta duração terem uma quantidade menor de dados a transmitir.

Nas Figuras 8(a) e 8(b), são mostrados, respectivamente, o RTT e o número de RTOs médio por conexão ativa em função da carga. Verifica-se que os valores para RTT apresentados por RED são menores do que os valores apresentados por HSTCP-H2. No entanto, esta diferença é pequena, chegando a ser no máximo 4% menor do que HSTCP-H2 quando o congestionamento está na sua intensidade máxima, ou seja, com carga de 1.0. O HSTCP-H2 produz valores de RTT maiores devido ao maior tamanho de fila. Como RED apresenta tamanho de fila basicamente constante, era de se esperar que apresentasse RTT com pouca variação. A quantidade de dados transmitido pelo tráfego WEB é menor e, portanto, diminui a probabilidade de um pacote ser retransmitido devido a sinalização por *Acknowledgment* (ACK), aumentando, assim, a necessidade de *timeout* para que a perda seja reconhecida e o pacote retransmitido, ou seja, o número de RTOs tende a aumentar. Na Figura 8(b), é possível verificar que para as cargas iniciais de 0.4 e 0.5 o número de RTOs do HSTCP-H2 é cerca de 12% menor do que o número de RTOs

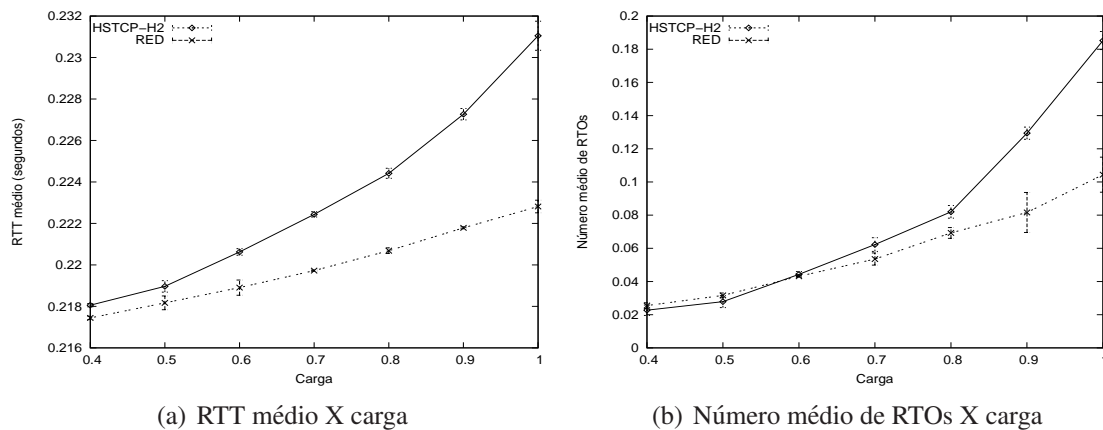


Figura 8. Tráfego WEB

apresentadas por RED. No entanto, a medida que o congestionamento se intensifica o HSTCP-H2 apresenta maior número de RTOs do que RED, sendo no mínimo 3% maior para carga de 0.6 e no máximo 77% para carga 1.0. Isto acontece devido ao fato de HSTCP-H2 ter uma quantidade significativamente maior de pacotes enfileirados. Como para tráfego WEB a quantidade de dados a transmitir é bem menor, os pacotes enfileirados por HSTCP-H2 possuem uma probabilidade maior de serem considerados perdidos, enquanto ainda permanecem na fila, do que os pacotes que estão enfileirados por RED em uma fila de tamanho praticamente constante.

Embora apresente número de RTOs maior do que RED, em decorrência dos valores elevados de janela de congestionamento, o *goodput* obtido por conexão ativa é consideravelmente maior quando HSTCP-H2 é empregado. Na Figura 7(b), pode-se verificar que o *goodput* obtido por HSTCP-H2 é no mínimo 7% maior do que RED com carga de 0.4 e no máximo 19% com cargas de 0.8. Portanto, o HSTCP-H2 confirma sua superioridade em utilizar a banda passante de forma eficiência tanto para tráfego FTP como para tráfego WEB.

As Figura 9(a) e 9(b) apresentam o tempo de transferência e o número de conexões em função da carga. Mesmo tendo obtido um número maior de RTOs para congestionamento intenso, a vazão de dados apresentada pelo HSTCP-H2 é maior, levando a uma latência de transferência de arquivos menor. O HSTCP-H2 apresenta valores de tempo de transferência menores do que RED para todo o intervalo de cargas testado, sendo no mínimo 5% menor do que RED com carga de 0.4 e no máximo 13% menor com carga de 0.8. Com latência menor, um número maior de conexões utilizam o enlace, ou seja, o número de conexões ativas que podem utilizar a mesma quantidade de recursos durante um período de tempo é maior. Para todo o intervalo de cargas testado o HSTCP-H2 apresenta um número maior de conexões ativas (Figura 9(b)), sendo que a maior diferença é de 12808 conexões sob carga de 1.0.

Os resultados obtidos demonstram o desempenho do controlador HSTCP-H2 em relação a política AQM RED sob o tráfego WEB. Devido ao elevado tamanho de fila obtido pelo HSTCP-H2, e as características do tráfego WEB, o controlador apresenta desempenho inferior ao RED para as métricas de RTT e RTO. Mesmo assim, o HSTCP-H2 utiliza mais eficientemente a banda passante, o que é resultados da elevada vazão e

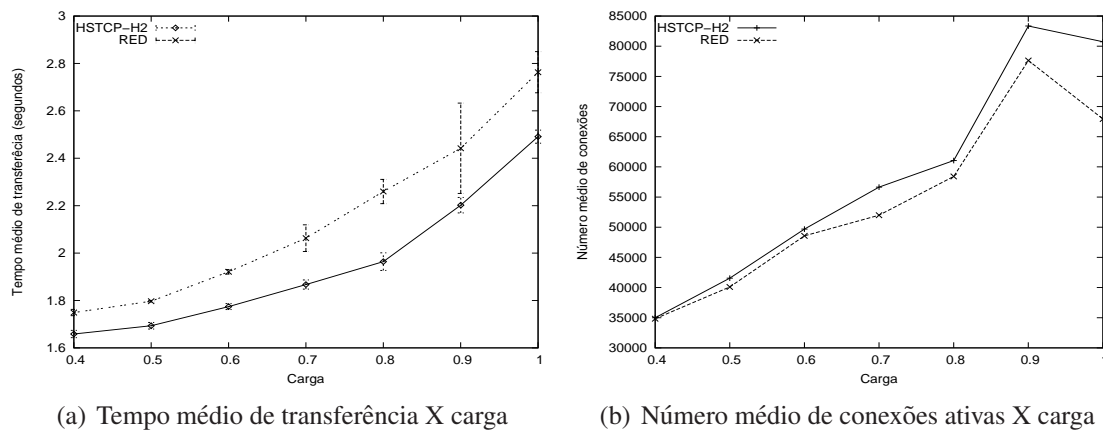


Figura 9. Tráfego WEB

das grandes janelas de congestionamento obtidas. Desta forma, estes resultados confirmam que o controlador ótimo HSTCP-H2 é, também, eficiente quando o tráfego é do tipo WEB em redes com produto banda atraso elevado.

6. Conclusões

Este trabalho avaliou o desempenho do controlador HSTCP-H2, derivado usando Teoria de Controle Ótimo para redes que utilizam o protocolo HSTCP, e comparou o seu desempenho com o desempenho produzido pela política RED, que foi adotada como padrão pela IETF

Resultados derivados através de simulações mostram que o *goodput* por conexão é significativamente superior, tanto sob tráfego FTP quanto sob tráfego WEB, quando o HSTCP-H2 é empregado do que quando RED é empregado. Estes resultados são consequência das grandes janelas de congestionamento produzidas pelo HSTCP-H2. Isto demonstra a capacidade do controlador em atingir o objetivo de projeto de “prevenir a subutilização do enlace”, enquanto que RED, com suas limitações de ajustes diante de variação das condições do meio, apresenta desempenho muito aquém do esperado. Verificou-se, também, a influência do protocolo HSTCP, o qual possibilitou que elevados valores de janela de congestionamento fossem obtidos. Sob tráfego FTP, o HSTCP-H2 obteve valores de RTT significativamente menores do que RED, o que está diretamente relacionado ao objetivo de projeto do controlador de “minimizar a variação do jitter”. Além disso, o número de RTOs do HSTCP-H2 é consideravelmente menor do que o produzido por RED, mostrando assim, a eficiência do controlador ótimo. Sob tráfego WEB, os valores de RTT e RTO obtidos pelo HSTCP-H2 são maiores do que os valores de RED, o que resulta da combinação dos elevados valores de fila do HSTCP-H2 e das características de curta duração do tráfego WEB. Entretanto, os valores de RTT e RTO sob tráfego WEB não influenciam negativamente a utilização eficiente dos recursos disponíveis. Desta forma, estes resultados indicam que o HSTCP-H2 é um candidato em potencial para ser adotado como política de AQM em redes com produto banda-atraso elevado que usam o protocolo HSTCP. Simulações usando topologias com múltiplos enlaces gargalo estão sendo conduzidas e os resultados reforçam as vantagens em se adotar o controlador HSTCP-H2 em redes que empregam o protocolo HSTCP.

Referências

- Augusto, L. R., da Fonseca, N. L. S., and Lima, M. M. A. E. (2007). Optimal aqm controller for the diffserv architecture. In *50th IEEE Globecom*, pages 1–6.
- Barford, P., Bestavros, A., Bradley, A., and Crovella, M. (1998). Changes in web client access patterns: Characteristics and caching implications. Technical Report 1998-023.
- Barman, D., Smaragdakis, G., and Matta, I. (2004). The effect of router buffer size on highspeed tcp performance. *Proc of IEEE Globecom'04*, pages 617–1621.
- Cardoso, K. and de Rezende, J. (2002). Http traffic modeling: Development and application. *IEEE International Telecommunications Symposium– ITS2002*.
- Firoiu, V. and Borden, M. (2000). A study of active queue management for congestion control. In *IEEE INFOCOM'00*, pages 1435–1444.
- Floyd, S. and Jacobson, V. (1993). Random early detection gateways for congestion avoidance. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 1(4):397–413.
- Floyd, S. (1997). Red: Discussions of setting parameters. <http://www.icir.org/floyd/redparameters.txt>.
- Floyd, S. (2000). Recommendation on using the gentle_ variant of red <http://www.icir.org/floyd/red/gentle.html>.
- Floyd, S., Ratnasamy, S. (2002). Modifying tcp's congestion control for high speeds. <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 of WISICT'04*, pages 1–6.
- Hollot, C. V., Misra, V., Towsley, D. F., and Gong, W. (2002). Analysis and design of controllers for aqm routers supporting tcp flows. *IEEE Trans. Automat. Contr.*, 47(6):945–959.
- Huang, X., Lin, C., Ren, F., and Yin, H. (2004). Highspeed tcp modeling and analysis. *Broadnets - First Annual International Conference on Broadband Networks*.
- Lima, M. M. A. E., da Fonseca, N. L. S., and Geromel, J. C. (2004). An optimal active queue management controller. In *Proc of IEEE ICC'04*, volume 4, pages 2261–2266.
- Long Chengnian, Yang Huilong, L. Z. and Xinping, G. (2006). Fairness performance analysis: Hstcp/droptail vs. hstcp/aqm. In *Proc of 25th Chinese Control Conference*, pages 1807–1810.
- Oliveira, M. C. and Geromel, J. C. (2004). Synthesis of non-rational controllers for linear delay systems. *Automatica*, 40(2):171–188.
- Santi, J., Fonseca, N. L. S., and Lima, M. M. A. E. (2007). Projeto de controladores ótimos para redes com produto banda-atraso elevado. *SBRC'07*, pages 899–912.
- Sonkoly, B., Trinh, T. A., and Molnár, S. (2005). Understanding highspeed tcp: A control-theoretic perspective. *The Third IASTED and Computer Networks (CCN 2005)*, pages 74–80.
- VINTproject (2008). NS: Network simulator. <http://www.isi.edu/nsnam/ns>.