

## Projeto de Controladores Ótimos para Redes com Produto Banda-Atraso Elevado

Juliana de Santi<sup>1</sup>, Nelson L. S. da Fonseca<sup>1</sup>, Michele M. A. E. Lima<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>Departamento 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 investigates the impact of design of optimal controllers for the Active Queue Management in networks with high bandwidth-delay product. We analyze the impact of design objectives on the performance. The congestion system investigated is composed by AQM controllers and flows generated by the HSTCP protocol.*

**Resumo.** *Este artigo investiga o projeto de controladores ótimos para o gerenciamento ativo de filas em redes com alto produto banda-atraso. Analisa-se a influência dos objetivos dos controladores propostos no desempenho obtido. O sistema de congestionamento estudado é composto pelo controlador e por fontes de dados gerados pelo protocolo HSTCP.*

### 1. Introdução

O aumento da capacidade dos enlaces na Internet e o crescente número de aplicações com altos requisitos de banda passante, em especial aplicações de redes em grades, leva ao desafio de se utilizar eficientemente a grande quantidade de banda disponível uma vez que o protocolo de transmissão TCP (*Transmission Control Protocol*), o mais utilizado na Internet, não é capaz de operar eficientemente em ambientes de alta velocidade.

O mecanismo de janela de congestionamento (*cwnd*) do TCP Reno, proposto por Jacobson [Jacobson 1988] é responsável por controlar a quantidade de dados injetada na rede. Os ajustes na janela de congestionamento são realizados pelos algoritmos de *Slow Start* e *Congestion Avoidance*, e a dinâmica de Incremento Aditivo e Decremento Multiplicativo (*Additive Increase Multiplicative Decrease - AIMD*) governam a janela de congestionamento, incrementando *cwnd* de um segmento para cada confirmação de recebimento de pacote (*Acknowledgment - ACK*) e dividindo *cwnd* pela metade quando ocorrem perdas de pacotes. O mecanismo de controle do TCP pode ser expresso, matematicamente, da seguinte forma:

$$ACK : cwnd := cwnd + \frac{1}{cwnd}; DROP : cwnd := cwnd - \frac{1}{2} * cwnd \quad (1)$$

onde, *ACK* é a sinalização de recebimento de pacotes e *DROP* é a sinalização de perda de pacotes.

A forma dos ajustes da janela de congestionamento do TCP Reno faz com que este seja um mecanismo inerentemente oscilatório, dado que ocorrem grandes variações no seu tamanho. Consequentemente, o tamanho de uma fila alimentada por um fluxo TCP também sofre grandes variações, levando ao aumento de atraso e do *jitter*. Esses efeitos negativos são ainda mais críticos em redes cujo produto da capacidade do enlace e do atraso de propagação é alto, denominadas redes com produto banda-atraso alto. Nessas redes, a quantidade de dados que ocupa completamente o enlace entre o emissor e o receptor é grande dado que a janela de congestionamento do TCP é proporcional ao produto banda-atraso. Quanto maior for a capacidade do enlace e/ou atraso maior deve ser o tamanho da janela para ocupar todo o enlace disponível. Outra questão a considerar é o longo período de tempo que esses recursos ficarão subutilizados, uma vez que com incremento da janela de um segmento a cada *Round Trip Time* (RTT), são necessários vários RTT's para que o recurso seja completamente utilizado.

No TCP Reno, os ajustes são realizados diante de indicação de congestionamento por meio de pacotes perdidos, portanto a tomada de decisão é lenta fazendo com que a forma de incremento linear seja muito conservativa e o decremento multiplicativo seja demasiadamente agressivo. Portanto, faz-se necessário mecanismos mais eficazes na determinação da banda passante disponível.

Para melhorar a capacidade do TCP em estimar a banda disponível e conseqüentemente aprimorar o seu desempenho em redes com grande produto banda-atraso, variações do TCP têm sido propostas [Floyd et al. 2002], [Falk and katabi 2004], [Katabi et al. 2002], [Kelly 2003], [Jin et al. 2004], [Xu et al. 2004],[Rhee and Xu 2005]. Dentre estas, destaca-se o HSTCP (*High Speed TCP*) por modificar os ajustes da janela de congestionamento somente em situações em que o TCP Reno não é efetivo, mantendo, portanto, compatibilidade com o TCP padrão.

O HSTCP [Floyd et al. 2002] utiliza duas funções de resposta para ajustar a janela de congestionamento. Nas situações em que o TCP Reno é eficiente a sua função de resposta é responsável pelos ajustes. No entanto, quando a janela é muito grande o HSTCP utiliza uma função de resposta com maior agressividade no incremento e maior suavidade no decremento posterior a perda de pacotes.

Gerenciamento ativo de filas (*Active Queue Management - AQM*) é um mecanismo implementado em roteadores, usado para sinalizar o estado de congestionamento da rede aos TCPs emissores. Os mecanismos de AQM marcam/descartam pacotes quando o congestionamento é incipiente, ou seja, antes das filas transbordarem a fim de evitar o crescimento do congestionamento. Assim, sistemas finais podem reagir a estas perdas através da redução na taxa de transmissão, prevenindo o congestionamento intenso.

RED (*Random Early Detection*) [Floyd and Jacobson 1993] é a política de AQM recomendada pela IETF (*The Internet Engineering Task Force*). Os objetivos desta política incluem assegurar um limite superior para o tamanho da fila e permitir rajadas ocasionais. Um dos grandes problemas apresentados por RED é a dificuldade do ajuste dos seus parâmetros, dado que é uma política baseada em heurísticas. Assim, dependendo das variações nas condições, o desempenho da rede pode ser seriamente degradado.

Para superar estas dificuldades, políticas de AQM baseadas em Teoria de Controle têm sido propostas. Nessas políticas, o sistema TCP/AQM é matematicamente modelado

através de funções de crescimento da janela de congestionamento e do tamanho da fila. O controlador AQM tem a função de determinar a probabilidade de descarte/marcação que estabiliza o tamanho da fila independentemente das variações das condições da rede.

No presente trabalho, são utilizados controladores ótimos  $H2$  [Lima 2005] para derivar políticas de AQM. A motivação para utilizar controladores ótimos  $H2$  é a possibilidade de expressar os objetivos almejados para a política de AQM. O foco deste trabalho é a comparação do desempenho de controladores derivados com objetivos diferentes, uma vez que o desempenho do mecanismo de congestionamento está diretamente ligado ao resultado da interação entre a sinalização do controlador e do mecanismo HSTCP. A escolha de um controlador é a etapa fundamental para se obter um sistema TCP/AQM eficiente e decisões mal feitas nessa etapa podem comprometer a finalidade de se implementar políticas de AQM no núcleo da rede.

*Assim, está fora de escopo do presente trabalho comparações dos controladores AQM derivados com outras políticas AQM.* É do conhecimento dos autores que apenas os trabalhos [Sonkoly et al. 2005], [Chen et al. 2002], investigam a eficiência de sistemas TCP/AQM para redes de alta velocidade, dado o recente interesse neste tipo de problema.

Este artigo está organizado da seguinte forma. A Seção 2 apresenta o mecanismo de controle de congestionamento do HSTCP. A Seção 3 mostra o projeto de controladores ótimos para gerenciamento ativo de filas. A Seção 4 apresenta os resultados numéricos. Por fim, a Seção 5 delinea as conclusões.

## 2. High Speed TCP

O *High Speed TCP* (HSTCP) proposto por Sally Floyd [Floyd et al. 2002] é uma modificação do mecanismo de controle de congestionamento do protocolo TCP para melhorar o desempenho das conexões TCP com grandes janela de congestionamento ou ambientes com produto banda-atraso elevado.

Na fase de *Congestion Avoidance*, os ajustes da janela de congestionamento do TCP Reno ( $cwnd$ ) são caracterizados por Incremento Aditivo e Decremento Multiplicativo - AIMD. Na abordagem AIMD, a variável  $cwnd$  é incrementada de um pacote por *Round Trip Time* (RTT), e a cada notificação de pacote marcado/descartado a janela é decrementada pela metade.

De acordo com os ajustes da janela de congestionamento do TCP, o valor de  $cwnd$  é dado por  $cwnd = \sqrt{\frac{1.5}{p}}$ , onde  $p$  é a probabilidade de descarte/marcação de pacotes; assim, para que o valor de  $cwnd$  seja elevado, o valor de  $p$  deve ser muito pequeno. Como por exemplo, para que uma conexão TCP possa manter uma taxa de envio de 10Gbps, seria necessária uma probabilidade de descarte/marcação de  $p \approx 2 * 10^{-10}$ , valor irrealista com as atuais tecnologias disponíveis.

Para contornar este problema e manter compatibilidade com o TCP Reno, o HSTCP utiliza duas funções de resposta. Para que isso seja possível, algumas variáveis auxiliares são utilizadas nos ajustes do HSTCP:

- High\_Window: representa o limite superior da janela de congestionamento;
- High\_P: é a probabilidade de descarte/marcação necessária para conseguir uma janela de congestionamento de High\_Window;
- Low\_Window: representa o limite inferior da janela de congestionamento;

- Low\_P: é a probabilidade de descarte/marcação para Low\_Window;
- High\_Decrease: especifica o parâmetro de decremento  $b(cwnd)$  para  $cwnd = \text{High\_Window}$ .

Em [Floyd et al. 2002] são sugeridos valores para as variáveis: High\_Window = 83.000; High\_P =  $10^{-7}$ ; Low\_Window = 38; Low\_P =  $10^{-3}$  e High\_Decrease = 0.1.

Quando  $cwnd < \text{Low\_Window}$ , ou seja,  $p$  é maior que  $10^{-3}$ , a função TCP Reno é utilizada. Quando  $cwnd \geq \text{Low\_Window}$  e a probabilidade de descarte/marcação para o ambiente deve ser muito pequena (menor que  $10^{-3}$ ), a função HSTCP com uma agressividade maior é utilizada.

Na função de resposta HSTCP a janela de congestionamento é ajustada por novos valores para os parâmetros de incremento aditivo ( $a$ ) e decremento multiplicativo ( $b$ ). Estes novos valores para  $a$  e  $b$  passam a ser dependentes do tamanho da janela de congestionamento atual e são dados por [Huang et al. 2004] e [Floyd et al. 2002]:

$$b(cwnd) = -0.12 \log(cwnd) + 0.69 \quad (2)$$

$$a(cwnd) = 0.16 cwnd^{0.8} \frac{b(cwnd)}{2 - b(cwnd)} \quad (3)$$

Assim, os ajustes do HSTCP são expressos por:

$$ACK : cwnd = cwnd + \frac{a}{cwnd}; \quad DROP : cwnd = cwnd - b * cwnd \quad (4)$$

### 3. Projeto de Controladores Ótimos AQM

O sistema de controle de congestionamento é visto como um controle de retroalimentação, no qual o controlador é responsável por marcar/descartar pacotes com certa probabilidade em função do tamanho da fila no roteador. Através da sinalização de pacotes marcados/descartados o TCP emissor ajusta sua taxa de transmissão para que esta esteja adequada com as condições correntes de rede.

Nesta seção, o controle de congestionamento é apresentado como um problema de controle. Controladores ótimos  $H2/AQM - HSTCP$  são derivados como políticas de AQM. A relevância em se utilizar controladores ótimos está na possibilidade da inserção de objetivos de desempenho para as políticas de AQM no projeto do controlador.

Estas políticas de AQM são derivadas a partir do modelo de fluxo do TCP. Para isso, equações diferenciais estocásticas são utilizadas para representar a dinâmica da janela de congestionamento e a forma de variação da fila com o tempo. O comportamento da janela do HSTCP, da fila e do atraso são dados por [Sonkoly et al. 2005]:

$$\dot{W}(t) = \frac{a(W(t))}{R(t)} - b(W(t))W(t) \frac{W(t - R(t))}{R(t - R(t))} p(t - R(t)) \quad (5)$$

$$\dot{q}(t) = \frac{N(t)W(t)}{R(t)} - C + \omega_q(t) \quad (6)$$

$$R = \frac{q}{C} + T \quad (7)$$

onde:  $W(t)$ : é a média do tamanho da janela HSTCP em pacotes;  $q(t)$ : é o tamanho da fila em pacotes;  $\omega_q(t)$ : é o ruído gerado pelo tráfego UDP;  $R(t)$ : é o tempo total de viagem (RTT) em segundos;  $C(t)$ : é a capacidade do enlace em pacotes/segundo;  $T_p$ : é o tempo de propagação em segundos;  $N(t)$ : é o fator de carga em número de conexões HSTCP;  $p(t)$ : é a probabilidade de marcação/descarte de pacotes.

A Equação (5) representa a dinâmica da janela de congestionamento do HSTCP, onde o primeiro termo corresponde ao seu incremento aditivo e o segundo termo ao de-cremento multiplicativo.

A Equação (6) representa a variação no tamanho da fila no HSTCP, sendo resul-tado da diferença entre a taxa de pacotes que chegam,  $\frac{NW}{R} + \omega_q(t)$ , e a capacidade do enlace,  $C$ . O termo  $\omega_q(t)$  é incluído para que os fluxos não adaptativos UDP, aqueles que não diminuem a taxa de transmissão na presença de congestionamento, sejam considera-dos na variação do tamanho da fila.

O sistema a ser controlado (5-7) é representado por  $(w, q)$  e  $p$  é a entrada para o sistema. O ponto de equilíbrio, onde a taxa de transmissão é máxima com perda mínima,  $(w_0, q_0, p_0)$  é obtido através da solução de  $\dot{W}(t) = 0$ ,  $\dot{q}(t) = 0$ ,  $R = \frac{q}{C} + T$ , e é dado por:

$$W_0 = \frac{R_0 C_0}{N_0}; q_0 = C_0(R_0 - T_p); p_0 = \frac{a_0 N_0^2}{b_0 (C_0 R_0)^2}; \quad (8)$$

O sistema (5-7) linearizado em torno do seu ponto de equilíbrio (8) é dado por:

$$\dot{x}_1(t) = -\frac{a_0 N_0}{R_0^2 C_0} (x_1(t) + x_1(t - R_0)) - \frac{b_0 C_0^2 R_0}{N_0^2} u(t - R_0) - \frac{a_0}{C_0 R_0^2} (x_2(t) - x_2(t - R_0)); \quad (9)$$

$$\dot{x}_2(t) = \frac{N_0}{R_0} x_1(t) - \frac{1}{R_0} x_2(t); \quad (10)$$

onde  $x_1(t)$ ,  $x_2(t)$  e  $u(t)$  expressam a perturbação da janela, da fila e da probabilidade de perda em torno do ponto de equilíbrio:  $x_1(t) \doteq W(t) - W_0$ ;  $x_2(t) \doteq q(t) - q_0$ ;  $u(t) \doteq p(t) - p_0$ .

A representação do sistema linearizado (9-10) na forma de estado de espaço com atraso contínuo é dado por (11). Qualquer estado pode ser representado por um ponto no estado de espaço. A análise do estado de espaço envolve as variáveis de entrada, de saída e variáveis de estado na modelagem de sistemas dinâmicos.

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= A_0 x(t) + A_1 x(t - R_0) + B_w w(t); \\ z(t) &= C_{z0} x(t) + C_{z1} x(t - R_0) + D_{zu} u(t); \\ y(t) &= C_y x(t - R_0) + D_{yw} w(t); \end{aligned} \quad (11)$$

onde:  $x(t)$  é o vetor de estado;  $u(t)$  é a entrada a ser controlada e representa a probabili-dade  $p(t)$ ;  $w(t)$  é o ruído externo produzido pelos tráfegos UDP;  $z(t)$  é a saída esperada para o sistema;  $y(t)$  é a saída obtida para o sistema.

O sistema descrito em (11) é conectado ao controlador em (12).

$$\hat{x}(t) = \hat{A}_0 \hat{x}(t) + \hat{A}_1 \hat{x}(t - R_0) + \hat{B}_y(t); \quad (12)$$

$$u(t) = \hat{C}_0 \hat{x}(t) + \hat{C}_1 \hat{x}(t - R_0) + \hat{D}_y(t).$$

Sendo que as matrizes do controlador (12) são dadas por:

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

$$B_u = \begin{bmatrix} -\frac{b_0 C_0^2 R_0}{N_0^2} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad B_w = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0.2 C_0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$D_{yw} = \begin{bmatrix} 0 & 0.02 C_0 \end{bmatrix}, \quad C_y = \begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix};$$

As matrizes  $A_0$ ,  $A_1$  e  $B_u$  são obtidas diretamente do sistema linearizado e representam, respectivamente, os termos do sistema sem atraso, os termos com atraso e a probabilidade de descarte/marcação no intervalo anterior.  $B_w$  é o ruído existente no sistema gerado por fluxos UDP, onde os fluxos UDP utilizam 20% da capacidade do enlace.  $C_y$  é o tamanho da fila no RTT anterior e  $D_{yw}$  representa o peso do ruído medido na saída, o qual, em geral é 10% do valor de  $B_w$ .

O controlador (12) deve estabilizar o sistema e otimizar a saída de referência  $z(t)$ . Assim, os objetivos de desempenho para a política de AQM devem estar representados no controlador.

Em [Hollot et al. 2002], objetivos de desempenho para políticas de AQM são sugeridos. A escolha dos objetivos de projeto para o controlador ótimo  $H_2$  leva em consideração a característica de retroalimentação do sistema de congestionamento (11) e seu estado  $(W, q)$ . Os objetivos de desempenho são definidos de forma a garantir não apenas a estabilidade do sistema, mas também que, o ponto de equilíbrio seja atingido o mais rápido possível e que a variação em torno do mesmo seja minimizada. Derivou-se, portanto, os seguintes objetivos de projeto para os controladores propostos:

- **1—Prevenção da subutilização do enlace e minimização do jitter:** A capacidade de utilizar completamente a banda disponível é um dos principais desafios a serem superados pelos mecanismos que controlam a transmissão de dados em redes com produto banda-atraso elevado. A minimização do *jitter* garante estabilidade para as métricas relacionadas ao tamanho da fila, atraso e sua variação;
- **2—Alcançar rapidamente a vazão ideal e minimizar o jitter:** Outra questão relacionada aos mecanismos de congestionamento em redes com produto banda-atraso elevado é o longo período levado para se utilizar completamente o recurso disponível, ou seja, demora-se um longo período no qual uma grande quantidade de recursos é subutilizada.

Os objetivos de desempenho esperados para a saída de referência  $z(t)$ , são representados nos elementos das matrizes  $C_{z0}$ ,  $C_{z1}$  e  $D_{zu}$ . Os valores atribuídos a estas matrizes devem garantir além da estabilidade do sistema que o ponto de equilíbrio seja atingido o mais rápido possível e que a variação em torno desse ponto seja minimizada. As matrizes  $C_{z1}$  e  $D_{zu}$  são as mesmas para os dois grupos de objetivos definidos:

$$C_{z1} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad D_{zu} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0.5 \end{bmatrix};$$

A matriz  $C_{z1}$  especifica que os valores desejados na saída esperada do sistema  $z(t)$ , são os valores obtidos no intervalo corrente e não no intervalo anterior sendo, assim, nula. A matriz  $D_{zu}$ , pondera o valor da probabilidade de descarte/marcação na saída.

As matrizes  $C1_{z0}$  para cada grupo de objetivos são dadas por:

$$C1_{z0} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ \frac{N_0}{R_0} & \frac{-1}{R_0} \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad C2_{z0} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{N_0}{R_0} & \frac{-1}{R_0} \\ 0 & 0 \end{bmatrix},$$

Para o primeiro grupo de objetivos, a primeira linha de  $C1_{z0}$ , representa a prevenção da subutilização do enlace, ou seja, a minimização da distância entre o tamanho medido para a fila  $q$  e seu valor no ponto de equilíbrio  $q_0$ . A segunda linha representa a minimização da variação em torno do ponto de equilíbrio da fila, ou seja, minimização do *Jitter*.

Para o segundo grupo de objetivos,  $C2_{z0}$ , a primeira linha da matriz expressa a minimização entre o tamanho da janela de congestionamento do HSTCP e seu valor ideal,  $w - w_0$ , ou seja, atingir rapidamente a vazão ideal. A segunda linha representa a minimização do *Jitter*.

Definidos os objetivos, a conexão do sistema linear com atraso (11) com o controlador (12) e dada por:

$$\begin{aligned} \dot{\bar{x}}(t) &= \mathcal{A}_0 \bar{x}(t) + \mathcal{A}_1 \bar{x}(t - R_0) + \mathcal{B}_w(t); \\ z(t) &= \mathcal{C}_0 \bar{x}(t) + \mathcal{C}_1 \bar{x}(t - R_0) + \mathcal{D}_w(t). \end{aligned} \tag{13}$$

A síntese do controlador segue a abordagem apresentada em [Oliveira and Geromel 2004], na qual os projetos de controladores para sistemas lineares com atraso são expressos e solucionados como desigualdades matriciais lineares, LMIs (*Linear Matrix Inequalities*).

Para garantir a estabilidade no sistema com atraso em (13), o Teorema 4-b apresentado em [Oliveira and Geromel 2004] é usado. Este teorema especifica que um sistema como (13) é assintoticamente estável e  $\|H_{wz}\|_2^2 < \gamma$ , se existem matrizes simétricas e definidas positivas  $W, Y_0$  e  $X_j$ , e matrizes  $F, R, L_j$  e  $Q_j$ , com  $j = 0, 1$ , tais que os seguintes LMIs tenham uma solução factível:

$$0 > \begin{bmatrix} \mathbf{A}_0 + \mathbf{A}_0^T & (\bullet)^T & (\bullet)^T \\ \mathbf{A}_1^T & -X_1 & (\bullet)^T \\ C_0 & C_1 & -I \end{bmatrix}, \tag{14}$$

$$0 < \begin{bmatrix} W & (\bullet)^T \\ \mathbf{B} & P_0 \end{bmatrix}, \quad trace(W) < \gamma \tag{15}$$

onde:

$$\mathbf{A}_0 = \begin{bmatrix} A_0 X_0 + B_u L_0 & A_0 \\ Q_0 & Y_0 A_0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{A}_1 = \begin{bmatrix} A_1 X_0 + B_u L_1 & A_1 \\ Q_1 & Y_0 A_1 + F C_y \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} B_w \\ Y_0 B_w + F D_{yw} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{P}_0 = \begin{bmatrix} X_0 & I \\ I & Y_0 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{C}_0 = \begin{bmatrix} C_z X_0 + D_{zu} L_0 \\ C_z \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C}_1 = \begin{bmatrix} D_{zu} L_1 & 0 \end{bmatrix},$$

Para resolver o problema convexo representado pelos LMIs (14) e (15), faz-se necessário definir o ponto de equilíbrio para o sistema, ou seja, devem ser atribuídos valores para os parâmetros RTT ( $R_0$ ), número de conexões ( $N_0$ ) e capacidade do enlace ( $C_0$ ) de modo a obter o ponto de equilíbrio ( $W_0$ ,  $q_0$  e  $p_0$ ). Para a escolha destes valores foram considerados alguns estudos existentes que caracterizam redes com produto banda-atraso elevado. Em [Shakkottai et al. 2004] o atraso médio para transmissões internacionais e intercontinentais é 200ms, portanto  $R_0 = 200$ ms. Considerando pacotes padrão Ethernet de 1500bytes, a capacidade de enlace de 1Gbps, é dada por  $C_0 = 83333$  pacotes. Em [Martin-Flatin and Ravot 2002], onde é feita uma categorização do tráfego que utiliza enlaces de alta velocidade, é observado que o número de conexões para o tráfego de muito longa duração responsável por transmitir *terabytes* de dados varia entre uma e dez conexões, portanto,  $N_0 = 10$ .

O problema convexo é numericamente resolvido usando um software para resolução de LMI, o LMISol [Oliveira and Geromel 2006], e os parâmetros  $N = 10$  fluxos HSTCP,  $RTT = 200$ ms, enlace de 1Gbps e pacotes de 1500bytes.

As funções de transferência no domínio da frequência para os controladores referentes aos dois grupos de objetivos são dadas por:

$$C1(S) = \frac{0.0002836s + 0.0009829}{s^2 + 3.687e^5s + 1.278e^6} \quad (16)$$

$$C2(S) = \frac{0.0002712s + 6.243e^{-5}}{s^2 + 3.52e^5s + 8.105e^4} \quad (17)$$

Para a implementação digital destes controladores é necessário a escolha de uma frequência de amostragem,  $f_s$ , tal que uma representação no domínio- $z$  possa ser obtida. O valor de  $f_s$  representa a frequência na qual a probabilidade de descarte/marcação é calculada, portanto, a frequência deve ser tal que o mecanismo de controle de congestionamento possa reagir apropriadamente a mudanças abruptas, não devendo ser severa de modo a permitir que mudanças transientes sejam desconsideradas.

Foram considerados valores de frequência variando de 10% a 80% da capacidade do enlace, sendo escolhida a frequência de  $f_s = 8333$ Hz, equivalente a 10% da capacidade do enlace no ponto de equilíbrio, como a frequência de amostragem para a representação no domínio- $z$ :

$$C1(z) = \frac{az^2 + bz - c}{z^2 - dz - e} = \frac{7.361e^{-10}z^2 + 3.06e^{-13}z - 7.358e^{-10}}{z^2 - 0.08609z - 0.9131} \quad (18)$$

$$C2(z) = \frac{az^2 + bz - c}{z^2 - dz - e} = \frac{7.357e^{-10}z^2 + 2.032e^{-14}z - 7.357e^{-10}}{z^2 - 0.09038z - 0.9096} \quad (19)$$



As funções de transferência entre  $\delta p = p - p_0$  e  $\delta q = q - q_0$ , podem ser convertidas nas equações de diferenças no tempo discreto  $kT$ , onde  $T = \frac{1}{f_s}$ . Os controladores no domínio- $z$  tanto para o grupo de objetivos 1 quanto para o grupo de objetivos 2 apresentam equações de diferença na forma:

$$\delta p_1(kT) = a\delta q(kT) + b\delta q((k-1)T) - c\delta q((k-2)T) + d\delta p_1((k-1)T) + e\delta p_1((k-2)T); \quad (20)$$

As equações de diferença para o grupo de objetivos 1 e para o grupo de objetivos 2 apresentam o mesmo formato (Equação 20). O que as diferencia são os valores atribuídos aos coeficientes  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$  e  $e$ . O Algoritmo (1) que implementa os controladores é executado a cada intervalo de amostragem de  $1/f_s$ . Inicialmente  $p_0$  é calculado em função de sua equação no ponto de equilíbrio (Equação 8). Posteriormente o valor para a probabilidade de descarte/marcação é obtido através da equação de diferença (Equação 20). As variáveis auxiliares  $q_{old}$  e  $p_{old}$  armazenam, respectivamente, os valores de  $q$  e  $p$  no intervalo anterior. As variáveis  $q_{old1}$  e  $p_{old1}$  armazenam, respectivamente, os valores de  $q_{old}$  e  $p_{old}$  no intervalo anterior.

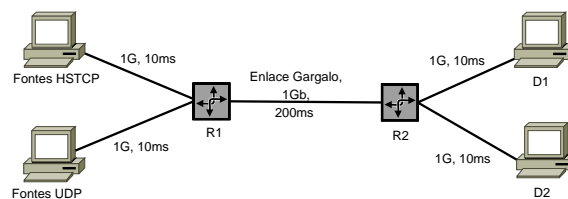
---

**Algorithm 1** Algoritmo utilizado no cálculo da probabilidade para os controladores

---

- 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. Comparação de Desempenho dos Controladores



**Figura 1. Topologia Utilizada nas Simulações**

Nesta secção, compara-se o desempenho dos controladores propostos através de simulações. Os algoritmos para os controladores HSTCP/AQM foram implementados no simulador de redes *Network Simulator - NS* [VINTproject 2006]. A topologia *dumb-bell* (Figura 1) é composta por um enlace gargalo com capacidade de 1Gbps, retardo de 200ms e *buffer* com tamanho equivalente a 20% do produto banda-atraso. A frequência de amostragem utilizada para derivar os controladores digitais foi de 8333Hz, gerando respectivamente os valores para os parâmetros de cada controlador apresentados na Tabela 1.

As cargas geradas variam entre 40% e 90% da capacidade do enlace, sendo que dessas cargas 80% corresponde a fluxos TCP com tráfego de longa duração (FTP) e 20%

Controlador	$a$	$b$	$c$	$d$	$e$
$C1(z)$	$7.361e^{-10}$	$3.06e^{-13}$	$7.358e^{-10}$	0.08609	0.9131
$C2(z)$	$7.357e^{-10}$	$2.032e^{-14}$	$7.357e^{-10}$	0.09038	0.9096

**Tabela 1. Parâmetros Utilizados na Implementação dos Controladores Ótimos**

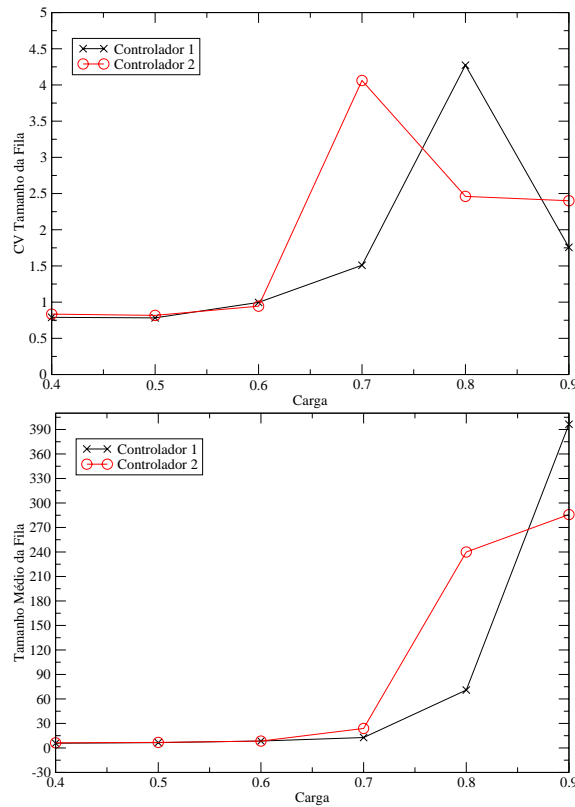
corresponde a fluxos UDP/CBR, como tráfego de interferência. Apesar do tráfego de curta duração web representar uma parte significativa do tráfego na Internet, variantes do protocolo TCP para redes de alta velocidade são concebidos para o uso eficiente da banda por aplicações de longa duração. Assim, utilizou-se somente aplicações de longa duração na escolha do controlador. A avaliação do controlador quando sujeito a tráfego de curta duração está sendo realizada atualmente na fase de comparação do controlador derivado neste artigo com outros controladores, tais como RED. A variação TCP utilizada é o HSTCP com pacotes de 1500bytes. O controle de fluxo é desabilitado de forma que o crescimento da janela seja governado somente pela rede e não pela janela do receptor.

Os controladores estudados atingem o mesmo ponto de equilíbrio, o que os diferencia é o caminho percorrido para alcançar o ponto de equilíbrio. Portanto, os controladores derivados apresentam desempenho equivalente para todas as métricas quando valores médios são utilizados na comparação dado que estes valores são computados considerando todo intervalo de simulação. Na realidade, os objetivos de projeto definidos influenciam na variação do desempenho em torno do seu valor médio para atingir o ponto de equilíbrio. Desta forma, utilizou-se para a comparação dos controladores o coeficiente de variação, uma medida de dispersão, que é a razão entre o desvio padrão e a média ( $CV = s/\bar{X}$ ).

O coeficiente de variação e a média obtida para a janela de congestionamento ( $cwnd$ ), probabilidade de descarte/marcação ( $p$ ) e tamanho da fila ( $q$ ) em função da carga da rede são apresentados nas Figuras 2 a 4. O controlador com melhor resultado é aquele que apresenta menores valores de  $CV$  para as métricas, ou seja, aquele que apresenta menor variação em torno do ponto de equilíbrio, garantindo maior estabilidade para o sistema.

Pode-se observar que o coeficiente de variação para o tamanho da fila (Figura 2) são similares e praticamente constantes entre as cargas de 0.4 e 0.6. Entre 0.6 e 0.75, e com cargas superiores a aproximadamente 0.87 o Controlador 1 apresenta menores valores para o CV do tamanho da fila. Para essa métrica os valores médios (Figura 2) aumentam com o aumento da carga, ou seja, o tamanho da fila aumenta a medida que o congestionamento se intensifica. A ocupação da fila é importante para garantir a ocupação do enlace.

O coeficiente de variação da probabilidade de descarte/marcação (Figura 3) apresentado pelo Controlador 1 é menor para todas as cargas. Na Figura 3, constata-se que a diferença entre os dois controladores não é significativa. Os baixos valores de  $CV$  apresentados pelos controladores para a probabilidade de descarte/marcação, é uma consequência da pouca variação de  $p$  em torno do seu ponto de equilíbrio  $p_0$ . A variação na taxa instantânea de perda é, conseqüentemente, bem menor beneficiando as conexões FTP dado que as mesmas apresentam longa duração.



**Figura 2. Coeficiente da Variação e Média do Tamanho da Fila X Carga**

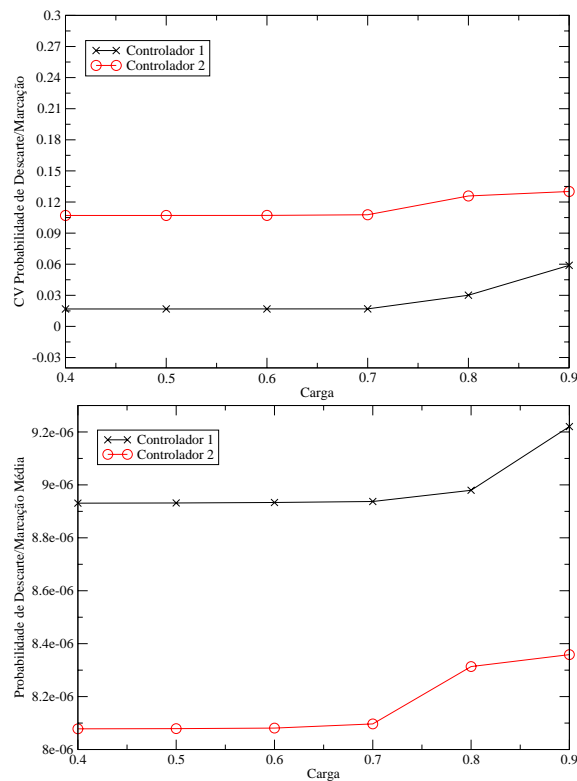
Os valores de coeficiente de variação para a janela de congestionamento (Figura 4) são, também, muito próximos para os dois controladores. Para a maioria das cargas o Controlador 2 apresenta menor  $CV$ . Observando os valores médios, Figura 4, verifica-se que o número de segmentos na janela permanecem em torno do valor de  $cwnd$  no ponto de equilíbrio (8).

A diferença entre os valores para o CV apresentados pelos controladores são pequenas. As diferenças são pequenas devido ao fato de que os dois grupos de objetivos dos quais foram derivados os controladores apresentam o objetivo de minimizar o *jitter*. Mesmo sendo pequenas as diferenças, por apresentar melhor CV para o tamanho da fila e para a probabilidade de descarte/marcação o Controlador 1 é o escolhido para tráfego de longa duração em redes com produto banda-atraso elevado. Neste controlador, são considerados os objetivos de prevenção da subutilização do enlace através da minimização entre o tamanho medido da fila  $q$  e o seu valor no ponto de equilíbrio  $q_0$ , e a minimização do *jitter*, assegurando a estabilidade da fila em torno do ponto de equilíbrio, ou seja, proporcionando estabilidade em relação ao atraso e sua variação.

## 5. Conclusão

Para contornar a dificuldade em se ajustar os parâmetros de políticas de gerenciamento ativo de filas baseadas em heurísticas, políticas de AQM baseadas em Teoria de Controle têm sido propostas. Neste artigo, foram derivados controladores baseados na Teoria de Controle Ótimo que permite a inclusão de objetivos no projeto do controlador.

O objetivo de desempenho/projeto de um controlador ótimo determina o cami-



**Figura 3. Coeficiente da Variação e Média para a Probabilidade de Descarte/Marcação X Carga**

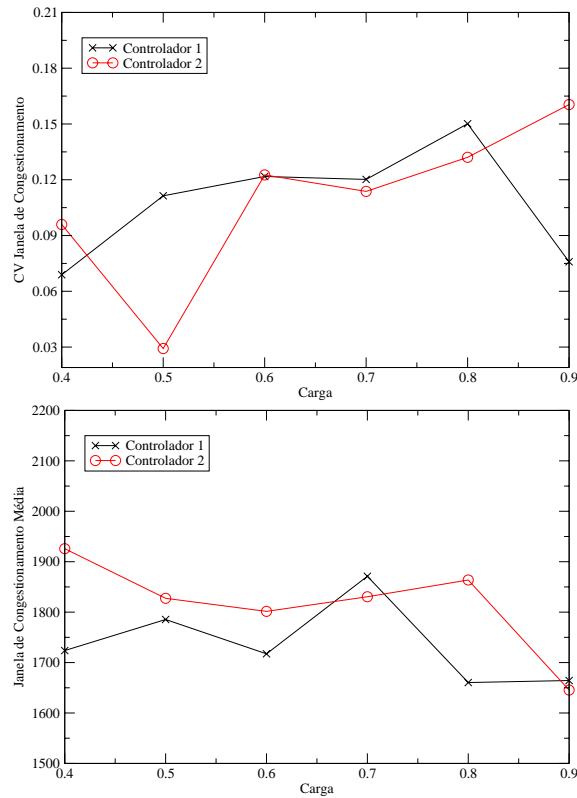
no percorrido pelo controlador para alcançar o ponto de equilíbrio, ou região na qual a estabilidade é obtida. Este trabalho investiga a influência dos objetivos de desempenho no sistema HSTCP/AQM em redes com produto banda-atraso elevado. Os objetivos de prevenção da subutilização do enlace, minimização do *jitter* e alcançar rapidamente a vazão ideal foram considerados na derivação dos controladores.

Simulações usando o simulador de redes *Network Simulator* indicam que o objetivo de desempenho “prevenção da subutilização do enlace e minimização do *jitter*” é o mais apropriado para tráfego de longa duração em ambientes com produto banda-atraso elevado.

Simulações considerando a comparação entre o controlador escolhido e controladores existentes, tais como RED [Floyd and Jacobson 1993] e PI (*Proportional Integrator*) [Hollot et al. 2001] estão sendo conduzidas.

## Referências

- Chen, J., Gerla, M., Sanadidi, M. Y., Paganini, O., and Wang, R. (2002). UCLA CSD TECHNICAL REPORT 1 fluid-flow analysis of TCP westwood with RED.
- Falk, A. and katabi, D. (2004). Specification for the explicit control protocol (xcp). Technical report, IETF. Internet-Draft.
- Floyd, S. and Jacobson, V. (1993). Random early detection gateways for congestion avoidance. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 1(4):397–413.



**Figura 4. Coeficiente da Variação e Média da Janela de Congestionamento X Carga**

- Floyd, S., Ratnasamy, S., and Shenker, S. (2002). Modifying tcp's congestion control for high speeds. *Preliminary Draft*.
- Hollot, C. V., Misra, V., Towsley, D. F., and Gong, W. (2001). On designing improved controllers for aqm router supporting tcp flows. In *IEEE INFOCOM'01*, pages 1726–1734.
- 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*.
- Jacobson, V. (1988). Congestion avoidance and control. In *ACM Computer Communication Review Proceedings of the Sigcomm*.
- Jin, C., Wei, D. X., and Low, S. H. (2004). Fast tpc: Motivation, architecture, algorithms, performance. *Proceedings of IEEE Infocom*.
- Katabi, D., Handley, M., and Rohrs, C. (2002). Congestion control for high bandwidth-delay product networks. *SIGCOMM'02*.
- Kelly, T. (2003). Scalable tcp: Improving performance in highspeed wide area network. Technical report, First International Workshop on protocols for Fast Long-Distance Networks.

- Lima, M. M. A. E. (2005). *Projeto de Controladores Ótimos para Gerenciamento Ativo de Filas*. PhD thesis, Instituto de Computação - Universidade Estadual de Campinas.
- Martin-Flatin, J.-P. and Ravot, S. (2002). Tcp congestion control in fast long-distance networks. *Technical Report CALT-68-2398, California Institute of Technology, USA*.
- Oliveira, M. C. and Geromel, J. C. (2004). Synthesis of non-rational controllers for linear delay systems. *Automatica*, 40(2):171–188.
- Oliveira, M. C. and Geromel, J. C. (2006). Lmi solver user's guide.
- Rhee, I. and Xu, L. (2005). Cubic: A new tcp-friendly high-speed tcp variant. *Third International Workshop on Protocols for Fast Long-Distance Networks*.
- Shakkottai, S., Srikant, R., Brownlee, N., Broido, A., and kc claffy (2004). The rtt distribution of tcp flows on the internet and its impact on tcp based flow control. *CAIDA paper*.
- Sonkoly, B., Trinh, T. A., and Molnár, S. (2005). Understanding highspeed tcp: A control-theoretic perspective. *The Third IASTED International Conference on Communications and Computer Networks (CCN 2005)*.
- VINTproject (2006). NS: Network simulator. <http://www.isi.edu/nsnam/ns>.
- Xu, L., Harfoush, K., and Rhee, I. (2004). Binary increase congestion control (bic) for fast long-distance networks. *IEEE Infocom*.