

Uma Avaliação da Eficácia do Controlador Ótimo H2-AQM para o Gerenciamento Ativo de Filas

Michele M. de A. E. Lima^{1*}, Nelson L. S. da Fonseca², José C. Geromel³

¹Colegiado de Informática
Universidade Estadual do Oeste do Paraná - UNIOESTE

²Instituto de Computação
Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP

³Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação
Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP

michele@unioeste.br, nfonseca@ic.unicamp.br, geromel@dsce.fee.unicamp.br

Abstract. *This paper introduces a novel AQM optimal controller. The synthesis of the controller uses a non-rational approach, in which stability and performance objectives of the system are completely expressed as Linear Matrix Inequalities (LMIs). The controller stabilizes the system under diverse network conditions. Simulation experiments using the NS network simulator were conducted. Results indicate a clear advantage of the proposed controller when compared to existing ones.*

Resumo. *Este artigo apresenta um novo controlador ótimo para o gerenciamento ativo de filas. A síntese do controlador utiliza uma abordagem não-racional, no qual a estabilidade e os objetivos de desempenho do sistema de AQM são completamente expressos e solucionados através de desigualdades matriciais lineares ou LMIs. O controlador estabiliza o sistema sob diversas condições de rede. Experimentos foram realizados utilizando o simulador de redes NS, e os resultados obtidos indicam uma clara vantagem de desempenho do controlador proposto quando comparado com os demais existentes.*

1. Introdução

A idéia por trás do Gerenciamento Ativo de Filas ou AQM (*Active Queue Management*) é a notificação antecipada do congestionamento incipiente, de forma a permitir que os TCP emissores possam reduzir sua taxa de transmissão antes que as filas transbordem, evitando assim, a degradação do desempenho do TCP.

O algoritmo *Random Early Detection*, RED [1], é o algoritmo de AQM recomendado pelo IETF para a Internet. RED estima o tamanho médio da fila, que é comparado com dois limiares min_{th} e max_{th} . Se o valor estiver abaixo de min_{th} o algoritmo está na zona normal de operação e nenhum pacote é descartado/marcado. Caso o valor esteja entre os dois limiares, cada pacote que chega é descartado/marcado com uma probabilidade p_a , que cresce linearmente com o tamanho médio da fila estimado. Se o valor estiver acima de max_{th} , todos os pacotes que chegam são descartados. Determinar os parâmetros de RED é um desafio, dado que quando seus valores não são corretamente definidos, seu desempenho cai significativamente.

Com o intuito de superar as dificuldades de determinar corretamente os parâmetros de RED, vários estudos baseados em heurísticas e simulações vêm sendo desenvolvidos. Contudo, tais estudos não garantem que um ponto de equilíbrio seja atingido, nem tampouco garantem a estabilidade do

*Este trabalho é suportado em parte pelo CNPQ

tamanho da fila. Por outro lado, investigações vêm sendo conduzidas para derivar configurações para RED de uma forma mais sistemática [2, 3, 4].

Para se projetar e desenvolver políticas de AQM que garantam estabilidade em torno de um ponto de equilíbrio, algumas políticas baseadas em Teoria de Controle tem sido propostas. Nestas políticas, o controle de congestionamento é visto como um sistema de controle de retroalimentação. O objetivo é compreender a dinâmica do congestionamento, para se poder garantir estabilidade no tamanho da fila. A taxa de transmissão dos nós fontes deve ser ajustada de acordo com o estado de congestionamento, que é determinado pela ocupação da fila. Desta forma, os controladores são responsáveis por determinar qual a probabilidade de descarte/marcação adequada que estabiliza o tamanho da fila independentemente das variações das condições da rede. Sistemas de AQM instáveis produzem grandes variações de retardo e baixa utilização do enlace, o que é pernicioso principalmente ao suporte de QoS.

Em [5], foi modelado a variação da janela TCP em função da variação do tamanho da fila, e em [6], os autores propuseram uma política de AQM que usa um controlador do tipo PI (*Proportional Integrator*) e compararam o seu desempenho com RED. PI - *Proportional Integrator*, utiliza um controlador de mesmo nome e baseia-se em um modelo simplificado da dinâmica do comportamento do TCP apresentado em [5]. Como a planta apresentada nesta proposta não representa toda a dinâmica do sistema, faz-se necessário identificar para quais condições da rede o controlador consegue estabilizá-lo.

Este artigo apresenta a política de AQM, H2-AQM, que utiliza um controlador ótimo. O controlador H2-AQM, utiliza o mesmo modelo da dinâmica do comportamento do TCP que foi usado para derivar o controlador PI-AQM. No entanto, a planta utilizada no desenvolvimento do controlador H2-AQM representa a dinâmica do sistema em detalhes, garantindo a sua estabilidade independente das condições de rede. Uma outra diferença é que H2-AQM usa técnicas de controle ótimo ao invés de controladores clássicos como PI.

A principal característica do controlador é a nova abordagem de se utilizar controladores não racionais para o sistema, superando-se a principal dificuldade de se projetar controladores racionais para sistemas com atraso [7]. Além disto, a estabilidade e os objetivos de desempenho do sistema de AQM são completamente expressos e solucionados através de desigualdades matriciais lineares ou LMIs (*Linear Matrix Inequalities*), o que significa que os parâmetros do controlador podem ser calculados através da solução de um simples problema convexo.

A política H2-AQM foi originalmente proposta em [8], onde a política foi avaliada baseada apenas em condições estáticas. O software Simulink foi utilizado para modelar e simular o controlador. As equações que modelam o sistema de controle de congestionamento foram implementadas no Simulink como um sistema de retroalimentação onde o controlador determina a probabilidade de descarte/marcação. Diferentes valores para os parâmetros de rede foram utilizados, mas durante todo o período de cada simulação tais valores permaneceram constantes. No presente trabalho, o sistema de controle de congestionamento é apresentado como um problema de controle e são explicitadas no projeto do controlador, as vantagens da utilização de controladores não-rationais. Além disto, foi investigado o melhor ponto de equilíbrio que maximiza a vazão e minimiza perdas. Utilizando este ponto de equilíbrio, avaliou-se a eficácia deste controlador em um ambiente dinâmico de rede fazendo-se simulações exaustivas utilizando o simulador de redes NS. A carga da rede foi variada e foi inserido tráfego de ruído com o intuito de verificar a robustez desta política sob diferentes condições de rede. Um gerador de tráfego foi utilizado para gerar tráfegos específicos FTP e WEB baseados nos modelos das distribuições estatísticas que os descrevem.

Este artigo é organizado da seguinte forma: a seção 2 apresenta o sistema de controle de congestionamento como um problema de controle. Nesta seção, o modelo do TCP utilizado na derivação da política de AQM proposta também é apresentado. Na seção 3, é apresentado o desenvolvimento do projeto de um controlador ótimo para AQM, utilizando uma abordagem não-razional para o sistema. Na seção 4, os resultados numéricos dos experimentos realizados para verificar o desempenho da política

de AQM proposta são apresentados. Finalmente, na seção 5, as conclusões são delineadas.

2. Controle de Congestionamento como um Problema de Controle

Nesta seção o sistema de controle de congestionamento é apresentado como um problema de controle.

Primeiramente é apresentado uma simplificação do modelo dinâmico que captura o comportamento da variação tanto da janela de TCP como do tamanho da fila, que foi desenvolvido utilizando análises de fluido e equações diferenciais estocásticas. O modelo é linearizado e o sistema obtido é apresentado como um sistema linear com atraso contínuo no tempo.

Em seguida, a dinâmica descrita é analisada em termos dos parâmetros de rede e o problema de controle de congestionamento é descrito como um problema de controle. Finalmente, é apresentado o controlador PI-AQM, no qual este artigo se baseia, que utiliza um controlador do tipo PI (*Proportional Integrator*) para determinar a saída desejada que dê o desempenho esperado para o sistema.

2.1. Modelo Dinâmico para o Comportamento do TCP

Um modelo dinâmico baseado em análises de fluidos e equações diferenciais estocásticas, que captura o comportamento da variação tanto da janela de TCP como do tamanho da fila foi introduzido em [5]. Uma versão simplificada deste modelo, que ignora o mecanismo de *timeout* é dada por [6]:

$$\dot{W}(t) = \frac{1}{R(t)} - \frac{W(t)}{2} \frac{W(t - R(t))}{R(t - R(t))} p(t - R(t)); \quad (1)$$

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

$$R(t) = \frac{q(t)}{C(t)} + T_p; \quad (3)$$

onde:

- $W(t)$: é a média do tamanho da janela TCP 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 TCP;
- $p(t)$: é a probabilidade de marcação/descarte de pacotes;

A equação (1) descreve a dinâmica da janela TCP, onde o primeiro termo corresponde ao seu crescimento aditivo e o segundo termo modela o seu decréscimo 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 . A equação (2) difere da equação apresentada em [6] pela presença do termo $\omega_q(t)$, incluído para que a variação no tamanho da fila também leve em consideração os pacotes referentes aos fluxos UDP, que são não adaptativos, o que significa que não diminuem sua taxa de transmissão na presença de congestionamento.

Seja (W, q) o estado do sistema a ser controlado (1-3), e p a entrada para o sistema. Seja (W_0, q_0, p_0) , o ponto de equilíbrio do sistema que pode ser obtido através da solução de $\dot{W}(t) = 0$, $\dot{q}(t) = 0$, and $R_0 = \frac{q_0}{C_0} + T_p$. A expressão para o ponto de equilíbrio é dada por:

$$W_0 = \sqrt{\frac{2}{p_0}} = \frac{R_0 C_0}{N_0} = \frac{q_0 + C_0 T_p}{N_0}; \quad (4)$$

$$q_0 = N_0 \sqrt{\frac{2}{p_0}} - C_0 T_p = C_0 R_0 - C_0 T_p; \quad (5)$$

$$p_0 = \frac{2N_0^2}{(R_0 C_0)^2} = \frac{2N_0^2}{(q_0 + C_0 T_p)^2}; \quad (6)$$

onde o número de conexões TCP e a capacidade do enlace são consideradas constantes, ou seja, $N(t) \equiv N_0$ e $C(t) \equiv C_0$.

Linearizando-se as equações (1) e (2) em torno do ponto de equilíbrio (W_0, q_0, p_0) , resulta em:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1(t) &= -\frac{N_0}{R_0^2 C_0} (x_1(t) + x_1(t - R_0)) - \frac{R_0 C_0^2}{2N_0^2} u(t - R_0) - \frac{1}{R_0^2 C_0} (x_2(t) - x_2(t - R_0)); \quad (7) \\ \dot{x}_2(t) &= \frac{N_0}{R_0} x_1(t) - \frac{1}{R_0} x_2(t); \end{aligned}$$

onde:

$$x_1(t) \doteq W(t) - W_0;$$

$$x_2(t) \doteq q(t) - q_0;$$

$$u(t) \doteq p(t) - p_0;$$

2.2. Problema de Controle AQM

As políticas baseadas em Teoria de Controle consideram a natureza intrínseca de retroalimentação do sistema de controle de congestionamento. Busca-se compreender a dinâmica do congestionamento, para poder se garantir estabilidade e robustez das condições de equilíbrio das métricas de desempenho desejadas. A taxa de transmissão dos nós fontes deve ser então ajustada de acordo com o estado de congestionamento, que é determinado pela ocupação da fila. A notificação de congestionamento para os nós fontes é feito através do descarte/marcação dos pacotes. Desta forma, os controladores são responsáveis por determinar qual a probabilidade de descarte/marcação adequada para estabilizar o tamanho da fila independentemente das variações das condições da rede. No caso específico de gerenciamento de filas, a importância da estabilidade está no fato de que sistemas de AQM instáveis produzem grandes variações de retardo e baixa utilização do enlace.

A dinâmica TCP descrita em (7) pode ser analisada em termos de parâmetros de rede tais como o número de fluxos TCP, N_0 , o tempo total de viagem (RTT), R_0 , a capacidade do enlace, C_0 , e em termos da natureza de retroalimentação do AQM [6]. A função do controlador AQM, $C(s)$, é marcar os pacotes com probabilidade p , como função do tamanho da fila medido q , como também estabilizar a planta, denotado pela função de transferência $P(s)$, irracional em s , que descreve como a probabilidade de marcação/descarte de pacotes afeta o tamanho da fila. A Figura 1 apresenta o sistema de congestionamento como um sistema de controle com retroalimentação.

2.3. PI - Proportional Integrator

PI - *Proportional Integrator* é uma política de AQM que utiliza um controlador de mesmo nome e baseia-se no modelo da dinâmica do comportamento do TCP apresentado anteriormente [6].

Para simplificar esta dinâmica, os projetistas de PI focalizaram no comportamento nominal (baixa-freqüência) da dinâmica da janela de forma a determinar o resíduo de alta-freqüência $\Delta(s)$. A função do controlador AQM, $C_{PI}(s)$, é marcar os pacotes com probabilidade $p(t)$, como função do tamanho da fila medido $q(t)$ e estabilizar a planta $P(s)$ e a dinâmica de alta freqüência da janela $\Delta(s)$.

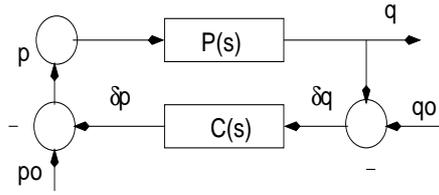


Figure 1: Controle de Congestionamento como um Sistema de Controle com Retroalimentação

A planta $P(s)$ é simplificada de forma a isolar as contribuições devido ao atraso no resíduo $\Delta(s)$, que é tratado como uma dinâmica não modelada do sistema. Nesta abordagem, para que o sistema seja estável o controlador $C_{PI}(s)$ também tem que estabilizar o resíduo $\Delta(s)$ e estabelecer um limite superior para $\Delta(s)V(s)$, onde $V(s)$ é a função de sensibilidade do sistema. Isto significa que é necessário a identificação dos valores de N_0 , R_0 e C_0 , para os quais o controlador consegue estabilizar o sistema.

3. Projeto de um Controlador Ótimo para AQM

Na seção anterior, o sistema de congestionamento foi apresentado como um problema de controle. Nesta seção, o sistema de controle de congestionamento apresentado em (7) é representado na forma de estado de espaço como um sistema linear com atraso e uma abordagem não racional é usada para derivar o controlador ótimo H_2 . A síntese do controlador é baseada nos resultados apresentados em [7], onde os projetos de controladores para sistemas lineares com atraso são expressos e solucionados como desigualdades matriciais lineares, LMIs (*Linear Matrix Inequalities*).

Desigualdades matriciais lineares (LMI's) possuem a seguinte forma:

$$F(x) \triangleq F_0 + \sum_{i=1}^m x_i F_i > 0; \quad (8)$$

onde: $x \in R^m$ é a variável e as matrizes simétricas $F_i = F_i^T \in R^{n \times n}$, $i = 0, \dots, m$ são dadas.

O símbolo de desigualdade presente em (8) significa que $F(x)$ é definida positiva, ou seja, $u^T F(x) u > 0$ para todo u diferente de zero e $u \in R^n$. O LMI apresentado em (8) representa um problema de restrição convexa sobre x , ou seja, o conjunto $\{x | F(x) > 0\}$ é convexo. Tal representação pode indicar uma grande variedade de restrições convexas sobre x . Em particular, vários problemas de Teoria do Controle podem ser expressos na forma de LMI's [9].

Em [7], os projetos de controladores não-rationais para sistemas lineares com atraso são expressos e solucionados como desigualdades matriciais lineares (LMI's). O uso de controladores não racionais supera a principal dificuldade de se projetar controladores racionais para sistemas com atraso, que é incorporar no projeto do problema a matriz de multiplicação utilizada para provar a estabilidade com relação à parte com atraso do sistema [7].

Em [7], a forma do controlador foi cuidadosamente escolhida de modo a reproduzir a estrutura da planta do sistema linear com atraso contínuo no tempo. A estabilidade do sistema é então analisada através da conexão da planta com o controlador. A razão principal para tal escolha é a possibilidade do uso de análise de estabilidade independente de atraso que gera condições de síntese que podem ser expressas e solucionadas como desigualdades matriciais lineares, o que implica que os parâmetros do controlador podem ser obtidos através da resolução de um simples problema convexo. Desta forma, a estabilidade e os objetivos de desempenho do sistema de AQM podem ser completamente expressos e solucionados através de desigualdades matriciais lineares ou LMIs, inclusive a matriz de multiplicação utilizada para provar a estabilidade com relação à parte com atraso do sistema.

3.1. Projeto do controlador H2

O sistema linear apresentado em (7) pode ser expresso no estado de espaço pelas seguintes equações que descrevem um sistema linear com atraso contínuo no tempo:

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= A_0x(t) + A_1x(t - R_0) + B_w w(t) + B_u u(t); \\ z(t) &= C_z x(t) + D_{zu} u(t); \\ y(t) &= C_y x(t - R_0) + D_{yw} w(t);\end{aligned}\tag{9}$$

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

O atraso presente em (7) é apresentado em (9) na saída $y(t)$. Agora, considere que o sistema descrito em (9) esteja conectado com o controlador:

$$\begin{aligned}\hat{x}(t) &= \hat{A}_0 \hat{x}(t) + \hat{A}_1 \hat{x}(t - R_0) + \hat{B} y(t); \\ u(t) &= \hat{C}_0 \hat{x}(t) + \hat{C}_1 \hat{x}(t - R_0) + \hat{D} y(t);\end{aligned}\tag{10}$$

Este controlador também pode ser expresso no domínio da frequência pela função de transferência não racional:

$$C(s) = (\hat{C}_0 + \hat{C}_1 e^{-sR_0})(sI - \hat{A}_0 - \hat{A}_1 e^{-sR_0})^{-1} \hat{B} + \hat{D};\tag{11}$$

O controlador $C(s)$, definido por (10), foi cuidadosamente escolhido de forma a reproduzir a estrutura da planta do sistema (9). A vantagem de se representar completamente a dinâmica do sistema na planta $P(s)$ está no fato de que a estabilização da planta pelo controlador $C(s)$, implica na estabilidade do sistema. O objetivo é determinar as matrizes do controlador (10) que estabilizem (9) e minimizem certas medidas na saída de referência $z(t)$. De forma a atingir este objetivo de projeto, é necessário, então, definir quais são os objetivos de desempenho desejados para a saída $z(t)$ e o que deve ser medido na saída, $y(t)$, ou seja, os objetivos de desempenho para a política de AQM projetada devem estar representados no controlador $C(s)$.

Os objetivos de desempenho para políticas de AQM como sugeridos em [6] são: prevenção e controle do congestionamento, eficiente utilização da fila e a garantia de baixo retardo e de baixa variação no retardo. Utilizar a fila de forma eficiente significa evitar que existam períodos alternados de transbordo e de ociosidade do servidor. O primeiro caso resulta na perda de pacotes, retransmissões desnecessárias, como também penaliza tráfegos em rajada, enquanto o segundo caso leva à subutilização do enlace. Para que se tenham baixos valores de retardo deve-se ter tamanhos pequenos de fila, o que pode gerar a subutilização do enlace. Além disto, é desejável que grandes variações no tamanho da fila sejam evitados para prevenir variações no retardo (*jitter*), o que é prejudicial para algumas aplicações de tempo real. Em resumo, o valor ideal da probabilidade de descarte/marcação deve maximizar as taxas de transmissão e minimizar o tamanho da fila sujeito às condições da rede, de forma a evitar perdas de pacotes desnecessárias. Para atingir tais objetivos, as matrizes do sistema (9), são definidas como:

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

$$B_u = \begin{bmatrix} -\frac{R_0 C_0^2}{2N_0^2} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad C_z = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ \frac{N_0}{R_0} & -\frac{1}{R_0} \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad D_{zu} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0.5 \end{bmatrix},$$

$$D_{yw} = [0 \quad 0.02C_0], \quad C_y = [0 \quad 1];$$

As matrizes A_0 , A_1 e B_u são obtidas diretamente da linearização do sistema. A_0 representa os termos do sistema sem atraso, enquanto A_1 representa os termos com atraso. A primeira coluna destas matrizes corresponde a $\frac{\partial f_1}{\partial x_i}$, e a segunda corresponde $\frac{\partial f_2}{\partial x_i}$, com $i = 1, 2$. B_u contém $\frac{\partial f_1}{\partial u}$ na primeira coluna, e $\frac{\partial f_2}{\partial u}$ na segunda coluna, onde f_1 é o lado direito da Equação (1) e f_2 o lado direito da Equação(2), $x_1 = W$, $x_2 = q$ e $u = p$.

O ruído existente no sistema, gerado pelos fluxos UDP, é controlado por B_w . O valor escolhido, $0.2C_0$, permite que os fluxos UDP utilizem até 20% da capacidade do enlace. Este valor é uma margem de tolerância satisfatória, dado que 95% dos bytes transmitidos na Internet são gerados pelo TCP [10].

C_z representa o objetivo do projeto, que é tentar obter o equilíbrio entre maximizar as taxas de transmissão e ao mesmo tempo minimizar o tamanho da fila e a sua variação. A primeira linha está relacionada com o tamanho da fila, e expressa o objetivo de minimizar a distância entre o valor medido para o tamanho da fila q , e o seu valor ideal obtido no ponto de equilíbrio, q_0 . A segunda linha expressa o objetivo de minimizar a variação da fila. D_{zu} , pondera o valor da probabilidade de descarte/marcação na saída. Diferentes valores de pesos foram verificados, variando de 0.3 a 0.9. Os resultados obtidos foram bastante similares, sendo 0.5 o valor adotado.

C_y indica que o valor de interesse medido na saída é o tamanho da fila no RTT anterior. Finalmente, D_{yw} , pondera o ruído que é medido na saída, que é geralmente 10% do valor presente na matriz B_w .

Depois de definidos os objetivos de desempenho, o próximo passo é conectar o sistema (9) com o controlador (10). Seja então, $\bar{x}(t)$ o vetor de estado aumentado que contém o vetor de estado $x(t)$ e o vetor de estado do controlador $\hat{x}(t)$:

$$\bar{x}(t) = \begin{bmatrix} x(t) \\ \hat{x}(t) \end{bmatrix}; \quad (12)$$

A conexão do sistema (9) com o controlador(10) resulta no sistema linear com atraso:

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

onde:

$$\begin{aligned} \mathcal{A}_0 &= \begin{bmatrix} A_0 & B_u \hat{C}_0 \\ 0 & \hat{A}_0 \end{bmatrix}, & \mathcal{A}_1 &= \begin{bmatrix} A_1 + B_u \hat{D} C_y & B_u \hat{C}_1 \\ \hat{B} C_y & \hat{A}_1 \end{bmatrix}, \\ \mathcal{B} &= \begin{bmatrix} B_w + B_u \hat{D} D_{yw} \\ \hat{B} D_{yw} \end{bmatrix}, & \mathcal{C}_0 &= [C_z \quad D_{zu} \hat{C}_0], \\ \mathcal{C}_1 &= [D_{zu} \hat{D} C_y \quad D_{zu} \hat{C}_1], & \mathcal{D} &= D_{zu} \hat{D} D_{yw}; \end{aligned}$$

Para garantir a estabilidade do sistema (13), o Teorema 4-b apresentado em [7] é usado. Este teorema especifica que um sistema como (13) é assintoticamente estável e $\|H_{wz}(s)\|_2^2 < \gamma$, 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:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{A}_0 + \mathbf{A}_0^T + X_1 & (\bullet)^T & (\bullet)^T \\ \mathbf{A}_1^T & -X_1 & (\bullet)^T \\ \mathbf{C}_0 & \mathbf{C}_1 & -I \end{bmatrix} < 0 \quad (14)$$

$$\begin{bmatrix} W & (\bullet)^T \\ \mathbf{B} & \mathbf{P}_0 \end{bmatrix} > 0, \quad \text{trace}(W) < \gamma \quad (15)$$

onde \mathbf{A}_0 , \mathbf{A}_1 , \mathbf{B} , \mathbf{C}_0 , \mathbf{C}_1 , \mathbf{D} e \mathbf{P}_0 são dadas por:

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_0 &= \begin{bmatrix} A_0 X_0 + B_u L_0 & A_0 \\ Q_0 & Y_0 A_0 \end{bmatrix}, & \mathbf{A}_1 &= \begin{bmatrix} A_1 X_0 + B_u L_1 & A_1 \\ Q_1 & Y_0 A_1 + F C_y \end{bmatrix}, \\ \mathbf{B} &= \begin{bmatrix} B_w \\ Y_0 B_w + F D_{yw} \end{bmatrix}, & \mathbf{P}_0 &= \begin{bmatrix} X_0 & I \\ I & Y_0 \end{bmatrix}, \\ \mathbf{C}_0 &= [C_z X_0 + D_{zu} L_0 \quad C_z], & \mathbf{C}_1 &= [D_{zu} L_1 \quad 0]; \end{aligned}$$

Este problema de programação convexa foi resolvido numericamente utilizando a rotina LMISol [11]. Os parâmetros de rede utilizados foram $R_0 = 0.256$ segundos, $C_0 = 3750$ pacotes/segundos, o que corresponde a um enlace de 15 Mb/s e pacotes com tamanho médio de 500 bytes e $N_0 = R_0 C_0$ sessões TCP. Estes valores dos parâmetros foram escolhidos de forma a se obter o melhor ponto de equilíbrio que maximiza a vazão e minimiza perdas. Para tanto, o ponto de equilíbrio deve proporcionar um valor extremamente pequeno da probabilidade de perda p_0 , de forma a garantir grandes valores para a janela de transmissão. Uma solução factível foi encontrada, e desta forma, pode-se afirmar que o sistema (13) é estável.

Depois de obtida uma solução factível, o próximo passo é determinar os parâmetros do controlador (10). Primeiramente, matrizes arbitrárias U_0 e V_0 devem ser escolhidas tais que $V_0 U_0 = I - Y_0 X_0$. As matrizes utilizadas foram $U_0 = X_0$ e $V_0 = X_0^{-1} - Y_0$. Assim, os parâmetros do controlador podem ser determinados por:

$$\begin{bmatrix} \hat{A}_0 & \hat{A}_1 & \hat{B} \\ \hat{C}_0 & \hat{C}_1 & \hat{D} \end{bmatrix} = \mathcal{K} \cdot \mathcal{M} \cdot \mathcal{N} \quad (16)$$

onde:

$$\begin{aligned} \mathcal{K} &= \begin{bmatrix} V_0^{-1} & -V_0^{-1} Y_0 B_u \\ 0 & I \end{bmatrix}; & \mathcal{M} &= \begin{bmatrix} Q_0 - Y_0 A_0 X_0 & Q_1 - Y_0 A_1 X_0 & F \\ L_0 & L_1 & 0 \end{bmatrix}; \\ \mathcal{N} &= \begin{bmatrix} U_0^{-1} & 0 & 0 \\ 0 & U_0^{-1} & 0 \\ -C_{y0} X_0 U_0^{-1} & -C_{y1} X_0 U_0^{-1} & I \end{bmatrix}; \end{aligned}$$

Na solução ótima obtida, as matrizes \hat{A}_1 e \hat{C}_1 são aproximadamente zero, sendo portanto ignoradas. Como resultado tem-se o cancelamento do termo de atraso do sistema, e o controlador torna-se racional. O cancelamento do termo de atraso, quando possível, é a estratégia global ótima para solucionar o problema de minimização da norma H_2 [7]. O controlador $C_{H_2}(s)$ representado por sua função de transferência no domínio da frequência é dado por:

H2-AQM-ProbabilityFunction()

$$\begin{aligned}
 p_0 &\leftarrow 2 * N_0^2 / (R_0 * C_0)^2; \\
 p &\leftarrow a * (q - 2 * q_0 + q_{old}) - b * p_{old} + p_0 * (1 + b); \\
 p_{old} &\leftarrow p; \\
 q_{old} &\leftarrow q;
 \end{aligned}$$

Figure 2: Algoritmo para o cálculo da probabilidade em H2-AQM

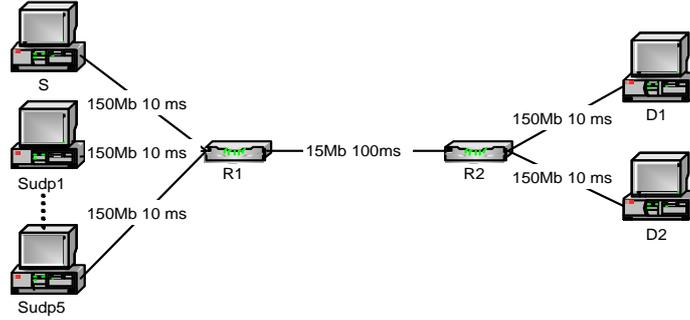


Figure 3: Topologia utilizada nos experimentos

$$C_{H2}(s) = \frac{0.82426s}{s + 8.977e004}; \quad (17)$$

Para que C_{H2} possa ser implementado, é necessário que seja escolhida uma frequência de amostragem f_s , para que uma representação no domínio- z possa ser obtida. A frequência escolhida foi $f_s = 375Hz$, ou 10% do valor da capacidade do enlace, C_0 . O controlador C_{H2} no domínio- z é dado por:

$$C_{H2}(z) = \frac{a(z + 1)}{z + b} = \frac{8.6742e - 006(z + 1)}{z + 0.8895}; \quad (18)$$

Observe que $C_{H2}(s)$, a função de transferência apresentada em (17) é de ordem 1 e não de ordem 2 como esperado, dado que com a fatoração da função de transferência, o fator $(z - 0.9885)$ presente tanto no numerador quanto no denominador, pode ser cancelado.

A função de transferência entre $\delta p = p - p_0$ e $\delta q = q - q_0$, apresentada em (18), pode ser convertida em uma equação de diferenças no tempo discreto kT , onde $T = \frac{1}{f_s}$:

$$\delta p(kT) = a[\delta q(kT) + \delta q((k - 1)T)] - b\delta p((k - 1)T); \quad (19)$$

O algoritmo para o cálculo da probabilidade de descarte/marcação em H2-AQM é bastante simples, e é executado a cada intervalo de amostragem $1/f_s$ (Figura 2). Inicialmente p_0 é computador baseado nos parâmetros de rede dados (N_0 , C_0 , R_0). Depois, o valor da probabilidade é calculado baseado em (19). O algoritmo utiliza apenas duas variáveis auxiliares: q_{old} e p_{old} , que armazenam os valores de q e p respectivamente no intervalo anterior. Com isto, o algoritmo além de ser bastante simples utiliza poucos recursos.

4. Resultados Numéricos

Com o intuito de verificar o desempenho e a eficácia do controlador H2-AQM, o algoritmo apresentado na Figura 2 foi implementado no simulador de redes NS [12]. O ponto de equilíbrio introduzido na seção 3 foi utilizado.

A frequência de amostragem utilizada para derivar o controlador digital foi de 375 Hz, gerando respectivamente os valores 1.547^{-9} e 0.3607 para os coeficientes a e b do controlador H2-AQM. O controlador PI para o mesmo ponto de equilíbrio foi derivado e os valores obtidos para os seus coeficientes para a mesma frequência de amostragem foi de digital 1.087^{-6} e 1.087^{-6} respectivamente. RED foi simulado utilizando os valores *default* do NS, que são: $min_{th} = 5$, $max_{th} = 15$ e $max_p = 0.1$.

A topologia, a capacidade dos enlaces, como também o tempo de propagação para cada enlace são apresentados na Figura 3. O enlace entre os nós R_1 e R_2 é o enlace gargalo. O tamanho do *buffer* utilizado por estes dois nós é de 800 segmentos.

Um gerador de tráfego, denominado TrafficGen, foi utilizado para gerar cargas de tráfegos específicos [13]. A carga foi variada de 0.4 a 0.9, de forma a permitir a verificação da robustez do controlador sob diferentes cargas. Uma distribuição híbrida Lognormal/Pareto foi utilizada para gerar o tráfego Web. O corpo da distribuição correspondente a uma área de 0.88 é modelada por uma distribuição Lognormal, com média de 7247 bytes, enquanto que a cauda é modelada por uma distribuição Pareto com média de 10558 bytes [14]. O tráfego FTP foi gerado utilizando uma distribuição exponencial com média de 512 KBytes. Tanto o tráfego Web como o tráfego FTP foram gerados a partir do nó S_1 para o nó D_1 .

O tamanho dos segmentos gerados foi de 500 bytes. Esta escolha deve-se ao fato de que diferentes artigos contendo levantamentos estatísticos com amostras da ordem de milhões de pacotes apontam que este é o valor médio do tamanho dos pacotes trafegando na Internet. O site [15] contém este artigos.

Foi utilizado um valor alto para a janela de recepção do receptor (1000), de forma a fazer com que o crescimento da janela de transmissão do TCP emissor fosse governado apenas pela rede e não pelo TCP receptor, ou seja, o controle de fluxo foi desativado.

O *goodput* médio obtido, o tempo total de viagem (RTT) médio por conexão e o número médio de retransmissões ocorridas devido a expiração do temporizador (RTO's) por conexão como função da carga da rede são apresentados nas Figuras 4 e 5.

Intervalos de confiança com 95% de nível de confiança foram gerados pelo método de replicação independente e não são apresentados em favor da interpretação visual dos gráficos, dado que são visualmente desprezíveis devido a pequena largura do intervalo.

Os roteadores têm que lidar não apenas com fluxos TCP mas também com fluxos não-adaptativos. Com o intuito de verificar a robustez do controlador AQM na presença de tráfego de ruído, foram incluídos fluxos não-adaptativos do tipo CBR/UDP que podem representar até 20% da capacidade do enlace. Estes fluxos são gerados e finalizados em diferentes intervalos a partir dos nós S_{udp_i} com destino ao nó D_2 .

No experimento com tráfego FTP (Figura 4), H2-AQM e PI-AQM obtiveram maiores valores de *goodput* que RED. o *goodput* obtido por H2-AQM é ao menos 12% maior que o obtido por RED para carga de 0.8 e no máximo 42% maior para carga de 0.8. Os valores obtidos por H2-AQM e PI-AQM são bastante semelhantes. Tanto H2-AQM como PI-AQM reduziram significativamente a ocorrência do número médio de retransmissões devido à expiração do intervalo de temporização (RTO's) quando comparados com RED. O número médio de RTO's produzidos por H2-AQM é um pouco menor que o produzido por PI-AQM. H2-AQM reduz a ocorrência de RTO's para zero para cargas de 0.4 à 0.6. Apenas para cargas de 0.9, H2-AQM gera um número médio de RTO's 4% maior que o produzido por RED e 15% maior que o produzido por PI-AQM.

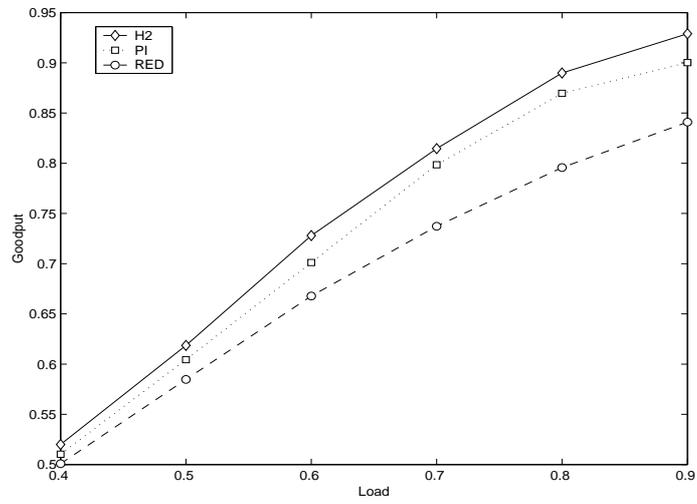
A única métrica que RED supera H2-AQM e PI-AQM no experimento com tráfego FTP é na duração média do tempo total de viagem (RTT). Isto acontece devido ao fato de que RED subutiliza a fila mesmo quando o congestionamento aumenta, mantendo o tamanho médio da fila quase inalterado. Conseqüentemente, o valor médio do RTT é quase constante. Entretanto, a manutenção de um tamanho médio de fila quase inalterado é ortogonal aos objetivos de H2-AQM e PI-AQM que são maximizar as

taxas de transmissão e ao mesmo tempo evitar descartes desnecessários de pacotes. Os valores médios de RTT obtidos por H2-AQM são no mínimo 1% maiores que os produzidos por RED para cargas de 0.4 e no máximo 40% maiores para cargas de 0.9. Os valores obtidos por PI-AQM são bastante similares aos obtidos por H2-AQM.

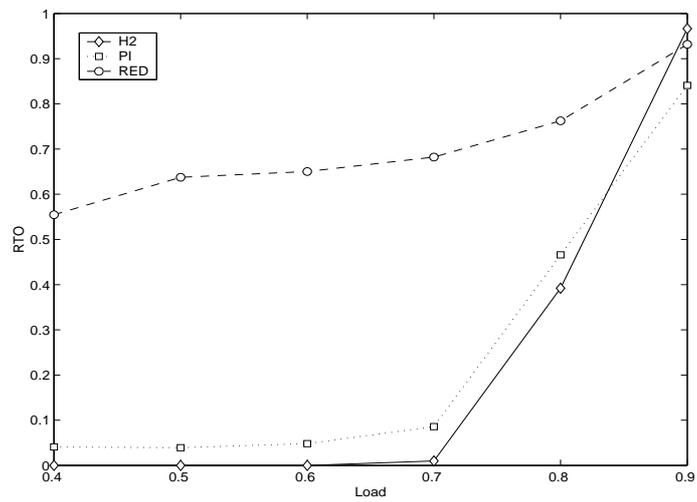
Apesar do modelo TCP utilizado para derivar o H2-AQM e PI-AQM ter sido desenvolvido considerando apenas a existência de tráfego TCP de longa duração como o tráfego FTP, também foi investigado a robustez destas duas políticas de AQM sob o tráfego Web. O tráfego de ruído foi gerado da mesma forma apresentada para os experimentos com tráfego FTP. Os resultados obtidos para os experimentos com tráfego Web são apresentados na Figura 5. Mais uma vez, H2-AQM e PI-AQM produziram valores de *goodput* maiores que RED, como também minimizaram a ocorrência de retransmissões devido à expiração do intervalo de temporização (RTO's). H2-AQM obteve no mínimo um valor de *goodput* 12% maior que RED para cargas de 0.4, e no máximo 47% maior para cargas de 0.8. Comparando-se com PI-AQM, H2-AQM obteve no máximo um valor de *goodput* 11% maior para cargas de 0.8. H2-AQM reduziu a ocorrência de retransmissões devido à expiração do intervalo de temporização (RTO's) para zero para cargas de 0.4 e 0.5. Quando comparado com RED a redução foi bastante significativa. A menor redução foi de 20% para cargas de 0.9. Comparando-se com PI-AQM, H2-AQM conseguiu uma redução de 75% na ocorrência de RTO's para cargas de 0.6. Entretanto, H2-AQM aumentou a ocorrência de RTO's de 4% e 6% para cargas de 0.8 e 0.9 respectivamente. Neste experimento, RED também superou H2-AQM e PI-AQM na redução do valor do RTT obtido por conexão. O valor obtido por H2-AQM é no mínimo 2% maior que o mesmo valor obtido por RED para cargas de 0.4 e no máximo 42% maior para cargas de 0.9. Comparado com PI-AQM, H2-AQM produziu valores similares para o RTT médio por conexão.

Os valores de *goodput* obtidos tanto por H2-AQM quanto por PI-AQM sob tráfego Web são consideravelmente maiores que os obtidos por RED. O comportamento dos valores de *goodput* apresentados por H2-AQM e PI-AQM são similares aos resultados obtidos nos experimentos com tráfego FTP. A diferença neste caso, é que H2-AQM supera PI-AQM e RED para cargas de acima de 0.7. Isto acontece devido ao fato de que para cargas acima de 0.7 o congestionamento de fato acontece, ou seja, ele é intenso. Tráfegos TCP de curta duração, como os tráfegos Web, são mais sensíveis a ocorrência de perdas de pacotes. A cada perda, a janela de congestionamento é diminuída pelo menos a metade do seu tamanho. Quando múltiplas perdas ocorrem, o tamanho da janela é reduzido várias vezes em sequência e o retorno ao seu tamanho original só ocorre depois de um intervalo considerável. Além disso, caso ocorram perdas em rajada de três ou mais pacotes, o TCP é forçado a esperar que o temporizador expire para descobrir que perdas ocorreram, mantendo a conexão inativa por um período relativamente longo. Outrossim, depois que o temporizador expira, o TCP emissor é forçado a entrar na dispendiosa fase de *Slow Start*. O H2-AQM reduz a ocorrência de retransmissões devido à expiração do intervalo de temporização (RTO's), o que significa que ele é muito mais robusto que o PI-AQM na presença de tráfego TCP de curta-duração e de tráfego de ruído.

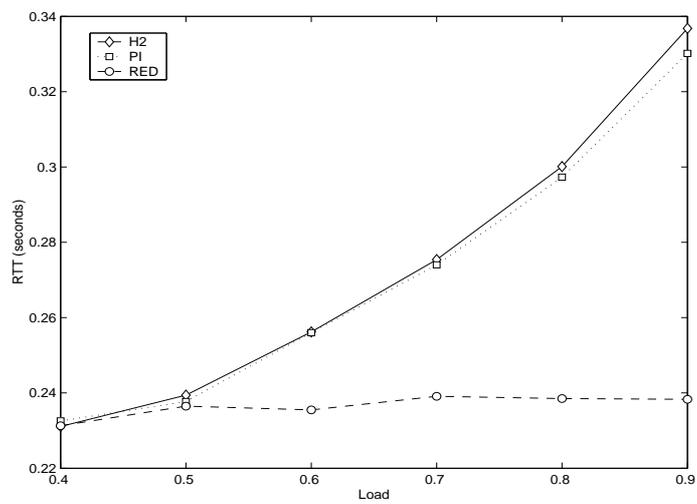
Apesar deste artigo ter sido baseado no trabalho desenvolvido em [6], foi utilizado um outro ponto de equilíbrio para se derivar os coeficientes de PI. O melhor ponto de equilíbrio que maximiza a vazão e minimiza perdas foi encontrado e utilizado nos experimentos. Através da utilização deste novo ponto de equilíbrio, H2-AQM supera PI-AQM. Além disso, o controlador PI-AQM derivado com este ponto de equilíbrio apresenta um desempenho superior ao PI original introduzido em [6]. Para ilustrar tal fato, os resultados de um dos experimentos realizados com tráfego Web são mencionados a seguir. H2-AQM produz valores de *goodput* 24% maiores que os do PI original para cargas de 0.8 e no mínimo 8% maiores para cargas de 0.4 e 0.5. Para o PI-AQM derivado com o novo ponto de equilíbrio, tem-se os valores mínimos e máximos superiores de *goodput* obtidos em relação ao PI original de 11% para cargas de 0.8 e 0.9 e 3% para cargas de 0.4 e 0.5 respectivamente.



Goodput x Carga

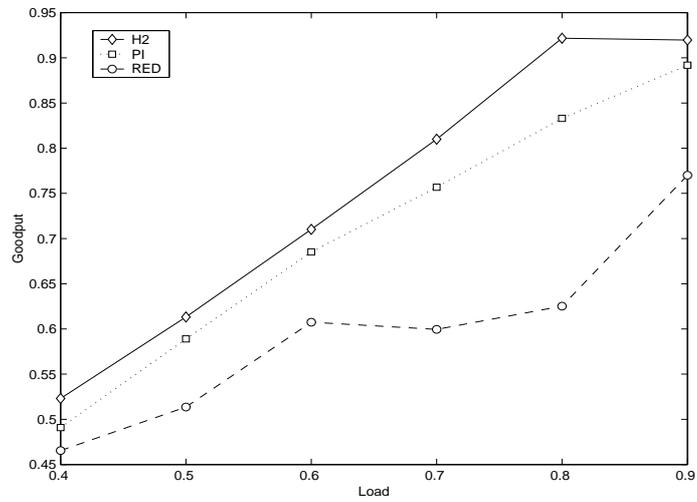


Número médio RTO's por conexão x Carga

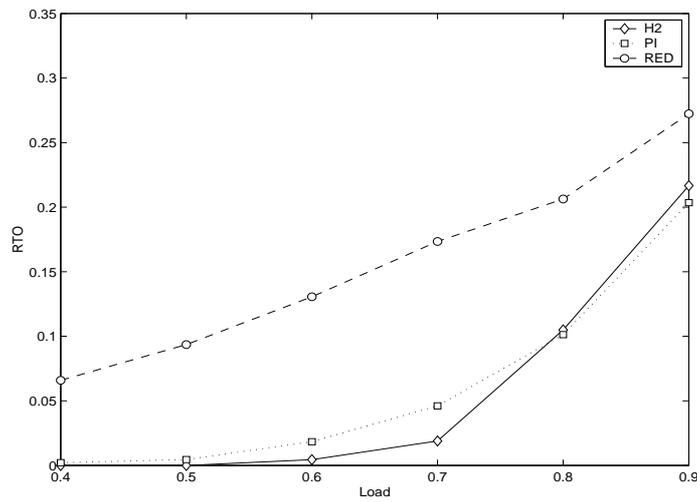


RTT médio x Carga

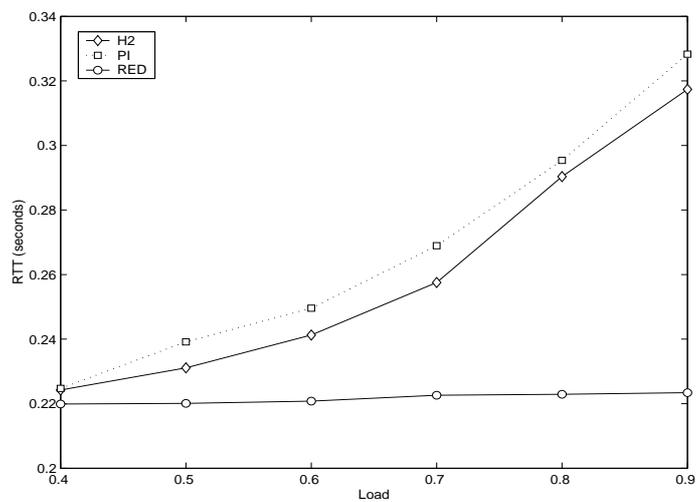
Figure 4: Desempenho do H2-AQM sob tráfego FTP



Goodput x Carga



Número médio RTO's por conexão x Carga



RTT médio x Carga

Figure 5: Desempenho do H2-AQM sob tráfego Web

5. Conclusões

Este artigo avaliou a eficácia do controlador H2-AQM. Na síntese do controlador H2-AQM, foi levada em consideração uma descrição detalhada do sistema de congestionamento, o que garante a sua estabilidade em diversas condições da rede. Apesar de ter sido utilizada uma abordagem não-racional, o controlador obtido foi racional, dado que o cancelamento dos termos em atraso no sistema foi possível, obtendo-se, desta forma, a solução ótima para o problema de minimização da norma H_2 . Além disto, o controlador obtido é de ordem um e não de ordem dois, como esperado, levando a um controlador simples, e conseqüentemente, o algoritmo obtido também. O melhor ponto de equilíbrio que maximiza a vazão e minimiza perdas foi investigado e utilizado nos experimentos. Com a utilização deste novo ponto de equilíbrio, foi demonstrado através de simulações que não apenas H2-AQM supera PI-AQM e RED em atingir os objetivos esperados para uma política de AQM, como o controlador PI-AQM derivado com este ponto de equilíbrio apresenta um desempenho superior ao PI original.

References

- [1] S. Floyd and V. Jacobson, "Random early detection gateways for congestion avoidance," *IEEE/ACM Trans. Networking*, vol. 1, no. 4, pp. 397–413, 1993.
- [2] V. Firoiu and M. Borden, "A study of active queue management for congestion control," in *Proceedings of Infocom 2000*, 2000, pp. 1435–1444.
- [3] P. Kuusela, P. Lassila, and J. Virtamo, "Stability of tcp-red congestion control," in *Proceedings of ITC-17*, Salvador da Bahia, Brasil, December 2001, pp. 655–666.
- [4] T. Bonald, M. May, and J.-C. Bolot, "Analytic evaluation of RED performance," in *In Proceedings of Infocom 2000*, 2000, pp. 1415–1424.
- [5] V. Misra, W.-B. Gong, and D. F. Towsley, "Fluid-based analysis of a network of AQM routers supporting TCP flows with an application to RED," in *Proc. ACM SIGCOMM'00*, Stockholm, Sweden, September 2000, pp. 151–160.
- [6] C. V. Hollot, V. Misra, D. Towsley, and W. Gong, "Analysis and design of controllers for AQM routers supporting TCP flows," *IEEE Trans. Automat. Contr.*, vol. 47, no. 6, pp. 945–959, Jun 2002.
- [7] M. C. Oliveira and J. C. Geromel, "Synthesis of Non-Rational controllers for linear delay systems," *Automatica*, vol. 40, no. 2, pp. 171–188, Feb 2004.
- [8] N. L. S. d. F. e. J. C. G. Michele M. de A. E. Lima, "Um controlador Ótimo para o gerenciamento ativo de filas," in *SBT 2003 - XX Simpósio Brasileiro de Telecomunicações*, Rio de Janeiro, Outubro 2003.
- [9] E. F. S. Boyd, L. Ghaoui and V. Balakrishnan, *Linear Matrix Inequalities in System and Control Theory*, ser. SIAM studies in applied mathematics. Philadelphia: SIAM, 1994, vol. 15.
- [10] K. Claffy, G. Miller, and K. Thompson, "The nature of the beast: Recent traffic measurements from an Internet backbone," in *Proceedings of INET'98*, Geneva, Switzerland, July 1998.
- [11] D. P. F. M. C. Oliveira and J. C. Geromel, *LMI Solver User's Guide*. [Online]. Available: <http://www.dt.fee.unicamp.br/~mauricio/lmisol/userguide.ps.gz>
- [12] S. Floyd. NS: Network simulator. [Online]. Available: <http://www.isi.edu/nsnam/ns>
- [13] K. V. Cardoso and J. F. de Rezende, "HTTP traffic modeling: Development and application," in *Proceedings of ITS2002*, Natal Brazil, Sep 2002.
- [14] P. Barford, A. Bestavros, A. Bradley, and M. Crovella, "Changes in web client access patterns: Characteristics and caching implications," Boston, MA, Tech. Rep. BU Computer Science Technical Report, BUCS-TR-1998-023, 4, 1998.
- [15] Papers by CAIDA. [Online]. Available: <http://www.caida.org/outreach/papers/>