

CONTROLE DE CONGESTIONAMENTO EM REDES DE COMPUTADORES UTILIZANDO MODELAGEM *FUZZY* COM FUNÇÕES DE BASE ORTONORMAIS

FLÁVIO HENRIQUE TELES VIEIRA*, FLÁVIO GERALDO COELHO ROCHA*, CHEILA OLIVEIRA*,
MARCOS A. DE SOUSA*

**Escola de Engenharia Elétrica e de Computação (EEEC), Universidade Federal de Goiás (UFG)
Av. Universitária, n. 1488 - Qd 86 - Bloco A - 3º piso - 74605-010 - Setor Leste Universitário
Goiânia, Goiás, Brasil*

Emails: flavio@eeec.ufg.br, flavio@inf.ufg.br, cheila@eee.ufg.br, marcos@eee.ufg.br

Abstract— In this work, we propose an adaptive predictive flow control scheme based on the TSK (Takagi-Sugeno) fuzzy model for congestion control in broadband networks. The proposed control scheme is intended to avoid congestion by applying a TSK type model with orthonormal basis functions (OBF) to predict the buffer queue length. For this end, we developed a training algorithm for the TSK-OBF model that was incorporated into the proposed control scheme, achieving low loss rate network performance. As essential part of the proposed congestion control scheme, we derive an analytical expression involving the fuzzy model parameters for the control of the flow rates that minimizes the queueing length variance. The proposed congestion control system is applied to a network environment with real traffic traces. Simulations are made in order to compare the performance of the proposed control algorithm to those of some existing control approaches in literature.

Keywords— Flow Control, Adaptive Prediction, Fuzzy Modeling, Network Traffic.

Área Principal: TEL e SI - PO em Telecomunicações e Sistemas de Informações

Resumo— Neste trabalho, propomos um esquema de controle adaptativo de fluxos de tráfego de redes de computadores baseado no modelo *fuzzy* Takagi-Sugeno (TSK). O esquema de controle proposto evita a ocorrência de congestionamento utilizando um modelo *fuzzy* TSK com funções de base ortonormais (FBO) para prever adaptativamente o tamanho da fila no *buffer* nos enlaces. Com o objetivo de ajustar dinamicamente os parâmetros do modelo *fuzzy*-FBO, desenvolvemos um algoritmo de treinamento para o mesmo. Como parte do esquema de controle de congestionamento proposto, apresentamos uma equação para o cálculo da taxa ótima dos fluxos para minimizar a variância do tamanho da fila no *buffer*. O controle de congestionamento proposto é aplicado em um cenário de rede com séries reais de tráfego. Comparações realizadas com outros métodos de controle de congestionamento demonstram que o controle de congestionamento proposto provê menores taxas de perdas, assim como manutenção da taxa de ocupação no *buffer* abaixo do valor estipulado.

Palavras-chave— Controle de Fluxos, Predição Adaptativa, Modelagem Fuzzy, Tráfego de Redes.

1 Introdução

Aplicações que exigem garantias de qualidade de serviço (QoS) têm sido cada vez mais encontradas na Internet, tais como voz sobre IP e vídeo conferência (Ditze and Jahnich, 2005; Cherry, 2005; Baldi and Ofek, 2000). Devido ao comportamento imprevisível e de rajadas dos fluxos em redes multimídia, congestionamentos podem ocorrer causando perdas de dados (bytes) e degradação dos parâmetros de QoS (Hatano et al., 2007). Desta forma, se faz necessário um mecanismo de controle de congestionamento eficiente para superar esses problemas e garantir a qualidade de serviço desejada.

Duas estratégias distintas de controle e gerenciamento de congestionamento são comumente encontradas na literatura: recuperação e prevenção (Duresi et al., 2006; Jacobson, 1995). A primeira tem como objetivo atuar na rede após a ocorrência de congestionamento para resolver tal problema. A segunda trata de detectar possíveis condições que levem a situações de congestionamentos e de executar procedimentos para impedir suas ocorrências. Esta estratégia de prevenção, que se baseia em antecipar situações de congestionamento, normalmente inclui modelos para análise do comportamento do tráfego, sendo este frequentemente complexo e não-linear (Lee and Fapojuwo, 2005).

A solução adotada neste trabalho está relacionada com a aplicação da modelagem *fuzzy* visando a predição do comportamento de fila no *buffer* e o controle da taxa de entrada dos fluxos de tráfego. Neste tipo de abordagem, um fator importante para o sucesso do controle de congestionamento é a aplicação de uma modelagem de tráfego adequada. Muitos estudos mostram que modelos *fuzzy* possuem vantagens sobre os modelos lineares em descrever o comportamento não-linear e variante no tempo de processos reais desconhecidos, como é o caso dos fluxos de tráfego de redes (Ouyang et al., 2005; Chen et al., 2000). De fato, a modelagem *fuzzy* é capaz de representar um sistema complexo não-linear através da combinação de vários modelos locais lineares invariantes no tempo (Chen et al., 2007; Sugeno and Yasukawa, 1993).

Neste trabalho, objetivamos estabelecer uma estratégia de controle de congestionamento cujos parâmetros sejam atualizados adaptativamente e que possa ser aplicada em diferentes tecnologias de rede. Para isso, propomos um algoritmo de treinamento adaptativo para um preditor *fuzzy* do tipo Takagi-Sugeno (TSK) que utiliza funções de base ortonormais (FBO), o qual é aplicado na modelagem e predição do tamanho da fila no *buffer* com o intuito de controlar as taxas das fontes em um enlace. Por fim, uma taxa ótima de regulação da fonte é calculada através dos parâmetros obtidos na predição do tamanho da fila no *buffer* da rede.

1.1 Funções de Base Ortonormais em Modelagem Fuzzy

Nesta seção, abordaremos alguns conceitos envolvendo funções de base ortonormais e sua relação com a modelagem *fuzzy*.

Para um sistema não-linear com memória finita, podemos representar sua relação G de entrada-saída $(u(k), y(k))$ através de um modelo não-linear de média móvel (NLMA- *Non-Linear Moving Average*) como (Oliveira et al., 1999):

$$y(k) = G(u(k-1), \dots, u(k-v)) \quad (1)$$

O sinal de entrada $u(k)$ do modelo (1) pode ser considerado como o desenvolvimento da sequência $u(k)$ em uma base tal que a entrada i seja dada por:

$$u_i(k) = \Phi_{mag,i}(q^{-1})u(k) = q^{-i}u(k) = u(k-i) \quad (2)$$

onde q^{-i} é o operador de deslocamento com $\Phi_{mag,i}(q^{-1}) = q^{-i}$.

A base de Laguerre é usada em vários contextos de identificação e controle de sistemas não-lineares (Oliveira et al., 1999) (Dumont and Fu, 1993). Neste trabalho, adotamos a base de Laguerre especialmente porque esta é completamente parametrizada por um único pólo, o pólo de Laguerre p . O conjunto de funções de transferência associadas a esta base é dada pela seguinte equação:

$$\Phi_{mag,i}(q^{-1}) = \sqrt{1-p^2} \frac{q^{-1}(q^{-1}-p)^{i-1}}{(1-pq^{-1})^i}, \quad i = 1, \dots \quad (3)$$

onde $p \in \{\mathbb{R} : -1 < p < 1\}$ é o pólo das funções de Laguerre (base de Laguerre). Pode-se notar que fazendo $p = 0$ em (3), resulta na base $\Phi_{mag,i}(q^{-1}) = q^{-i}$. Portanto, a base $\Phi_{mag,i}(q^{-1}) = q^{-i}$ é um caso especial da base de Laguerre.

A saída do modelo expressa por (1), pode ser reescrita como:

$$y(k) = H(l_i(k), \dots, l_n(k)) \quad (4)$$

onde $l_i(k) = \Phi_{mag,i}(q^{-1})u(k)$ é a i -ésima função de Laguerre no instante de tempo k , n é o número de funções de base utilizadas e H é um operador não-linear. Note que a operação não-linear correspondente a H pode ser realizada através da modelagem *fuzzy*.

As funções de Laguerre $l_i(k)$ são recursivas e podem ser obtidas por equações de estado da seguinte forma (Oliveira et al., 1999):

$$\mathbf{l}(k+1) = A\mathbf{l}(k) + b\mathbf{u}(k) \quad (5)$$

$$y(k) = H(\mathbf{l}(k)) \quad (6)$$

onde $\mathbf{l}(k) = [l_1(k) \dots l_n(k)]^T$. A matriz A e o vetor b dependem da ordem do modelo n e do valor do pólo p como segue (Ninness and Gustafsson, 1995):

$$A = \begin{pmatrix} p & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 1-p^2 & p & 0 & \dots & 0 \\ (-p)(1-p^2) & 1-p^2 & p & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ (-p)^{n-2}(1-p^2) & (-p)^{n-3}(1-p^2) & (-p)^{n-4}(1-p^2) & \dots & p \end{pmatrix} \quad (7)$$

$$b = \sqrt{(1-p^2)} [1 \quad -p \quad (-p)^2 \quad \dots \quad (-p)^{n-1}]^T \quad (8)$$

Dado um número de funções de Laguerre n (ordem do modelo), a estimação de um valor adequado para o pólo p da base ortonormal acarreta uma melhor representação do sistema a ser modelado. Objetivamos introduzir informações a respeito do comportamento multifractal dos processos de tráfego no cálculo do pólo p . Propomos a aplicação da modelagem *fuzzy* na implementação do operador não-linear H em (6) que em conjunto com as funções de base de Laguerre constituem a modelagem *fuzzy-FBO* (Funções de Base Ortonormais) proposta.

Utilizamos o cálculo do parâmetro α apresentado em (Vieira and Ling, 2009) para se obter o pólo dominante do sistema. O pólo p utilizado para o cálculo das funções de base ortonormais para o modelo *fuzzy-FBO* pode ser dado por (Vieira and Rocha, 2011):

$$p = -\frac{1}{2^{\log_2(\frac{\alpha+1}{\alpha+1/2})}} \quad (9)$$

Note que uma vez que o pólo p é dado em função do parâmetro multifractal α , podemos estimá-lo adaptativamente.

2 Modelagem *Fuzzy-FBO*

A estimação do valor do pólo permite que estendamos a interpolação *fuzzy* de modelos locais, que é a idéia central do modelo TSK, a um contexto de funções de base ortonormais. Nossa proposta se baseia em uma versão em espaço de estados do modelo TSK, ou seja, cada regra do modelo *fuzzy* representa um modelo de espaço de estados diferente:

Regra R^i :

Se $l_1(k)$ é L_1^i , ... e $l_n(k)$ é L_n^i

$$\text{Então} \begin{cases} \mathbf{l}_i(k+1) = A_i \mathbf{l}_i(k) + b_i \vec{x}(k) \\ y_i(k) = H_i(\mathbf{l}_i(k)) \end{cases} \quad (10)$$

onde R^i corresponde à i -ésima regra, a matriz A_i e o vetor b_i dependem do pólo $p_i(k)$ e $H_i(\mathbf{l}_i(k))$ é o mapeamento que relaciona a saída $y_i(k)$ do modelo local i a seu correspondente estado de Laguerre (funções de base ortonormais) $\mathbf{l}_i(k) = [l_1(k) \ l_2(k) \ \dots \ l_n(k)]$, sendo $\vec{x}(k) = [x_1(k) \ x_2(k) \ \dots \ x_n(k)]$ o vetor de entrada e L_j^i a função de pertinência *fuzzy* para a regra i associada a j -ésima variável de premissa. As variáveis de premissa são os estados de Laguerre do modelo *fuzzy* TSK-FBO resultante. A saída do modelo *fuzzy-FBO* é dada por

$$y(k) = \frac{\sum_{i=1}^C y_i(k) w_i(\mathbf{l}_i(k))}{\sum_{i=1}^C w_i(\mathbf{l}_i(k))}, \quad (11)$$

onde C é o número de regras (modelos locais) e os pesos $w_i(\mathbf{l}_i(k))$ da regra i são dados por

$$w_i(\mathbf{l}_i(k)) = \prod_{j=1}^n L_j^i(l_j(k)). \quad (12)$$

2.1 Algoritmo de Treinamento Adaptativo para o Modelo Fuzzy-FBO

Nessa seção, apresentamos um algoritmo de agrupamento regressivo *fuzzy* adaptativo (ARFA) para o modelo preditivo *fuzzy*-FBO. Este algoritmo foi proposto em (Vieira and Rocha, 2011).

No algoritmo ARFA, levamos em conta a distribuição espacial dos dados considerando o erro de regressão e a distância entre os dados de entrada e os *clusters*. Seja a função custo do algoritmo ARFA definida como:

$$J = \sum_{i=1}^C \sum_{k=1}^N u_{ik}^2 (r_{ik} d_{ik})^2 \quad (13)$$

sujeito a

$$\sum_{i=1}^C u_{ik} = 1, \quad \text{para } 1 \leq k \leq N \quad (14)$$

onde u_{ik} é o grau de ativação da i -ésima regra para o k -ésimo padrão de treinamento, C é o número de regras *fuzzy* e N é o número total de dados de treinamento. Na equação (13), r_{ik} é o erro entre a k -ésima saída desejada $y(k)$ do sistema modelado e a saída da i -ésima regra $f_i(\vec{x}(k); \vec{a}^i(k))$ com a k -ésima entrada, isto é,

$$r_{ik} = y(k) - f_i(\vec{x}(k); \vec{a}^i(k)), \quad (15)$$

com $i = 1, 2, \dots, C$ e $k = 1, 2, \dots, N$. Na mesma equação (13), d_{ik} é a distância entre o vetor de entrada $\vec{x}(k)$ no instante discreto k e o centro do i -ésimo cluster β_i , ou seja,

$$d_{ik} = \vec{x}(k) - \beta_i. \quad (16)$$

O grau de ativação u_{ik} da i -ésima regra pode ser calculado por (Vieira and Rocha, 2011):

$$u_{ik} = \frac{1/2(r_{ik}^2 d_{ik}^2)}{\sum_{i=1}^C 1/2(r_{ik}^2 d_{ik}^2)} \quad (17)$$

Enquanto o centro do i -ésimo cluster (β_i) pode ser calculado pela seguinte equação (Vieira and Rocha, 2011):

$$\beta_i = \frac{\sum_{z=1}^N r_{iz}^2 u_{iz}^2 \vec{x}(z)}{\sum_{z=1}^N r_{iz}^2 u_{iz}^2} \quad (18)$$

Para completarmos a primeira fase do algoritmo de treinamento ARFA aplicado à modelagem *fuzzy*-FBO, devemos obter os parâmetros θ_{j1}^i e θ_{j2}^i das funções de pertinência Gaussianas $A_j^i(\theta_{j1}^i; \theta_{j2}^i)$. Tais parâmetros caracterizam a j -ésima função de pertinência da i -ésima regra *fuzzy*, onde $1 \leq j \leq n$ e $1 \leq i \leq C$, e podem ser obtidos a partir de u_{iz} e dos elementos $x_j(k)$ do vetor de entrada através das seguintes equações (Chen et al., 2003):

$$\theta_{j1}^i = \frac{\sum_{z=1}^N (u_{iz})^2 x_j(z)}{\sum_{z=1}^N (u_{iz})^2} \quad (19)$$

$$\theta_{j2}^i = \sqrt{\frac{\sum_{z=1}^N (u_{iz})^2 (x_j(z) - \theta_{j1}^i)^2}{\sum_{z=1}^N (u_{iz})^2}} \quad (20)$$

Em resumo, no algoritmo ARFA, são encontrados (ou ajustados) o grau de ativação u_{ik} através da equação (17), a melhor posição para o centro dos *clusters* por meio da equação (18), o vetor de parâmetros $\vec{a}^i(k)$ das partes consequentes e o formato mais adequado para as funções de pertinência gaussianas que compõem cada regra *fuzzy* do modelo (Vieira and Rocha, 2011).

3 Sistema de Controle de Congestionamento em Redes

Nessa seção, apresentamos o sistema de controle de congestionamento implementado. Este sistema de controle visa prever adaptativamente o comportamento da fila no *buffer* e, a partir dos parâmetros do modelo de previsão de tráfego, controlar a taxa da fonte de tal forma que o tamanho da fila no *buffer* seja igual ou inferior ao nível de referência desejado.

A estrutura básica do sistema de controle de congestionamento considerado é mostrada na Figura 1, na qual estão identificados todos os elementos do sistema. O tráfego que chega ao *buffer* vem de duas

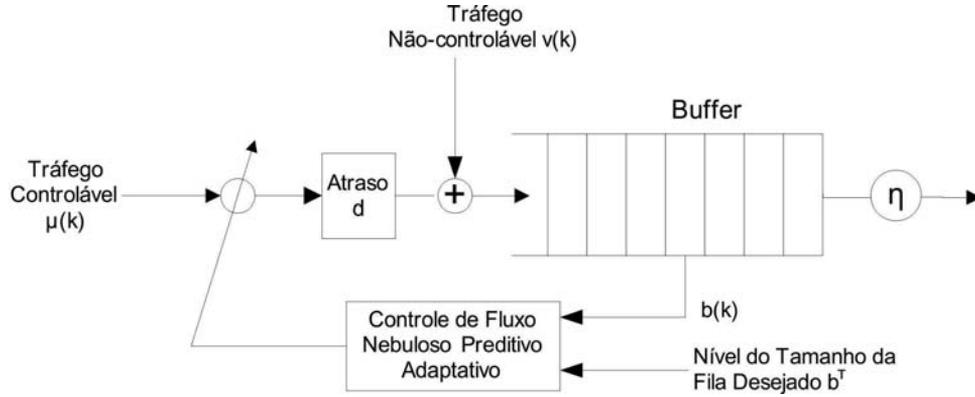


Figura 1: Sistema de Controle de Congestionamento.

classes distintas. Uma está relacionada ao tráfego controlável $\mu(k)$ que adapta sua taxa às condições da rede. A taxa de transmissão do tráfego TBD (Taxa de Bits Disponível) é regulada pelo controlador *fuzzy* adaptativo proposto implementado no *switch*. A outra classe é a do tráfego não-controlável $v(k)$.

Devido aos diversos tipos de serviços e aplicações, tais como, dados, voz e vídeo sendo multiplexados nos nós das redes, a dinâmica da ocupação do *buffer* é um processo complexo e não-linear. Esta ocupação expressa pelo tamanho de fila no *buffer* do sistema da Figura 1 pode ser descrita através da equação de Lindley (Jacobson, 1995):

$$b(k+1) = \min\{\max[b(k) + (\mu(k-d) + \nu(k) - \eta) \times T, 0], B_{max}\}, \quad (21)$$

onde B_{max} é a capacidade máxima do *buffer*.

4 Cálculo da Taxa Ótima de Controle de Fluxos

A taxa de controle ótima é dada em função do valor do tamanho da fila no *buffer* d passos à frente. Uma estimativa do tamanho da fila $b(k)$ no *buffer* d passos à frente é fornecida pela saída do preditor/modelo *fuzzy* proposto quando aplicado à predição de amostras deste processo pela seguinte equação:

$$\hat{b}(k+d) = \sum_{i=1}^C b^i(k+d) h^i(k), \quad (22)$$

onde

$$h^i(k) = \frac{w^i(k)}{\sum_{i=1}^C w^i(k)} \quad \text{com} \quad w^i(k) = \min_{j=1 \dots n} A_j^i(\vec{\theta}_j^i; x_j(k)) \quad (23)$$

e

$$\begin{aligned} b^i(k+d) = & \alpha_0^i + \alpha_1^i b(k-p) + \alpha_2^i b(k+p+1) + \\ & \dots + \alpha_{p+1}^i b(k) + \beta_{p+2}^i \mu(k-q) + \\ & \beta_{p+3}^i \mu(k-p+1) + \\ & \dots + \beta_{p+q+2}^i \mu(k). \end{aligned} \quad (24)$$

Em (Vieira and Rocha, 2011), mostramos que a taxa ótima de controle para o sistema proposto é dada por:

$$\begin{aligned} \mu^o(k) = & \beta_0(k) \times \\ & \times (b^\tau - \sum_{i=1}^C (\alpha_0^i + \sum_{t=1}^{p+1} \alpha_t^i b(k-p-1+t)) + \\ & + \sum_{t=1}^q \beta_{t+p+1}^i \mu(k-q-1+t)) h^i(k) \end{aligned} \quad (25)$$

onde

$$\beta_0(k) = \frac{\sum_{i=1}^C \beta_{p+q+2}^i h^i(k)}{\left(\sum_{i=1}^C \beta_{p+q+2}^i h^i(k)\right)^2 + \lambda} \quad (26)$$

Segundo a equação (25), a taxa ótima de controle de fluxo $\mu^o(k)$ é obtida em função do vetor de entrada $\vec{x}(k)$, do vetor de parâmetros consequentes $\vec{a}^i(k)$ e do nível desejado do tamanho da fila no *buffer* b^τ .

Tabela 1: Resultados de Desempenho entre os Métodos de Controle de Congestionamento

Parâmetro	Traço Real	Realimentação Binária	Cont. de Cong. Proporcional	Cont. de Cong. Fuzzy-FBO
Média do <i>Buffer</i>	1.109×10^5	4.022×10^5	6.916×10^5	1.452×10^3
Variância do <i>Buffer</i>	3.573×10^{11}	4.176×10^{11}	4.916×10^{11}	7.761×10^7
TPB	8.9854	10.6477	10.7568	0.0000
Utilização do Enlace	99.9044	85.8284	100.000	87.6575
Vazão Controlável	9.975×10^4	5.567×10^4	8.748×10^4	4.388×10^3

5 Avaliação do Esquema de Controle de Congestionamento Proposto

Nessa seção, avaliamos o esquema de controle de congestionamento proposto e o comparamos a outros métodos de controle de congestionamento. Inicialmente, apresentamos os métodos de controle e as medidas de desempenho utilizados na comparação. Em seguida, validamos o esquema de controle de congestionamento proposto através de simulações. Para validação do esquema de controle proposto considerou-se um nó de uma rede de comunicação sendo alimentado pelas séries de tráfego reais *dec-pkt-2* e *dec-pkt-3*¹ na escala de 512ms.

Os métodos utilizados na comparação de desempenho do esquema de controle de congestionamento proposto são: método de Realimentação Binária (Ramakrishnan and Jain, 1990) e método de Controle Proporcional (Habib and Saadawi, 1992). Tais métodos foram escolhidos por serem bastante utilizados na literatura (Karnik and Kumar, 2005; Zhang et al., 2000) e por possuírem características semelhantes ao método proposto, isto é, esses métodos analisam o comportamento do tamanho da fila no *buffer* e estimam uma nova taxa para as fontes controláveis a partir de condições pré-estabelecidas, sendo também independentes de protocolos específicos de rede. Além disso, assim como no esquema de controle proposto, nestes métodos de controle um valor limitante para o tamanho da fila no *buffer* pode ser estabelecido.

A avaliação do desempenho do esquema de controle de congestionamento proposto se baseia nas seguintes medidas de desempenho: TPB (Taxa de Perda de Bytes), Utilização do enlace e a Vazão da Taxa Controlável.

Para a simulação do esquema de controle de congestionamento proposto neste cenário, estipulamos uma configuração para a rede considerada de tal forma a obtermos um ambiente com perdas. O tamanho do *buffer* dos roteadores é fixado em $B_{max} = 1.5 \times 10^6$ bytes e o nível desejado para o tamanho da fila no *buffer* é estabelecido como $b^\tau = 30\%B_{max}$, ou seja, $b^\tau = 4.5 \times 10^5$ bytes. O parâmetro λ do cálculo da taxa ótima de controle de fluxo é fixado inicialmente em 1.

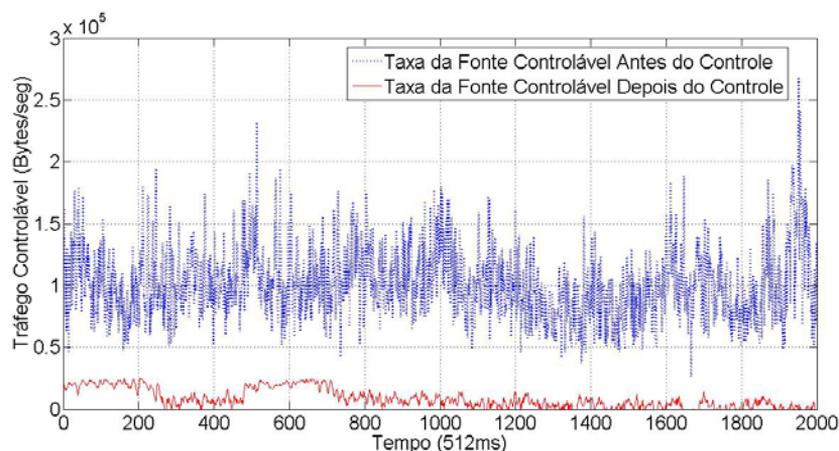


Figura 2: Taxa de fonte controlável antes e depois da aplicação do método de controle de congestionamento proposto.

A Figura 2 apresenta uma comparação da taxa da fonte controlável antes e depois da aplicação do controle de congestionamento proposto. Através da Figura 2, é possível observar que a taxa controlável

¹<http://ita.ee.lbl.gov/html/contrib/DEC-PKT.html>

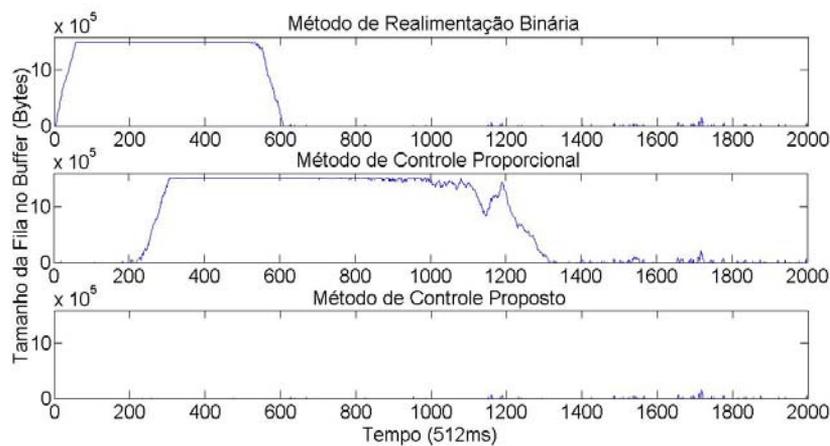


Figura 3: Tamanho da fila no *buffer* obtido com o controle de congestionamento proposto e outros métodos.

foi reduzida e algumas vezes até mesmo levada a um valor nulo. Como foi já dito anteriormente, a fonte controlável usa a banda que está disponível, ou seja, a taxa de tal fonte é igual a taxa correspondente a banda que não está sendo usada pelas fontes prioritárias. Logo, é possível que em determinados instantes, o tráfego dessas fontes controláveis seja todo vetado em favor das fontes não-controláveis.

Comparamos o desempenho do esquema de controle de congestionamento proposto com os dos métodos de Realimentação Binária e o método de Controle Proporcional. A Figura 3 mostra o tamanho da fila no *buffer*, onde em cada figura referente a cada nó da rede, apresenta-se respectivamente o método de Realimentação Binária, o método de Controle Proporcional e o método proposto. Através da Figura 3, pode-se observar que o método proposto obtém um processo de fila no *buffer* bem mais comportado e abaixo do nível desejado.

Por meio da Tabela 1, pode-se verificar que ao ser aplicado o controle de congestionamento baseado em *fuzzy-FBO* a média e a variância do comprimento da fila no *buffer* diminuiu significativamente. Além disso, o TPB é reduzido a zero, oferecendo melhor desempenho em termos de taxa de perda e de comportamento da fila no *buffer*. No entanto, a utilização do enlace, após a aplicação do controle de congestionamento proposto baseado em *fuzzy-FBO*, é reduzida uma vez que o esquema de controle limita as taxas de fonte controláveis. Os resultados das simulações confirmam que o método de controle de congestionamento proposto obtém melhores resultados em termos de perda de dados e comportamento da fila no *buffer*, mantendo o comprimento da fila abaixo do valor desejado, o que nem sempre é garantido pelos outros métodos de controle de congestionamento considerados.

6 Conclusões

No presente trabalho introduzimos um novo esquema de controle não-linear de fluxos de tráfego. Para tal, desenvolvemos um algoritmo de treinamento adaptativo para um modelo preditivo *fuzzy* do tipo TSK. A estratégia do controle de congestionamento proposto consiste em prever o comportamento do sistema, mais especificamente, o tamanho da fila no *buffer*, e em seguida, com os parâmetros obtidos na predição, controlar a taxa da fonte controlável de tal forma que a variância do tamanho da fila seja mínima possível.

Avaliamos o esquema de controle de congestionamento proposto em um cenário de rede com séries de tráfego real. Os resultados das simulações mostraram que o método proposto apresentou, entre os métodos de controle analisados, melhores resultados de desempenho, tais como, taxa de perda de byte nula e uma menor variância do tamanho da fila no *buffer* em função de um pequeno decremento da utilização do enlace.

Verificou-se que a aplicação do esquema de controle proposto garante que o processo de fila no *buffer* não ultrapasse o valor estipulado. Com isso, é possível se obter ao mesmo tempo um retardo máximo e taxa de perda nula para os fluxos, ou seja, se garante alguns parâmetros de qualidade de serviço aos fluxos de tráfego. Enfim, o algoritmo de controle preditivo adaptativo baseado no modelo *fuzzy* proposto é uma ferramenta promissora em situações reais para controle adaptativo dos fluxos de tráfego com garantia de QoS.

Agradecimentos

Agradecemos o apoio do CNPQ e da Capes.

Referências

- Baldi, M. and Ofek, Y. (2000). End-to-end delay analysis of videoconferencing over packet-switched networks, *IEEE/ACM Transactions on Networking* **8**(4): 479 – 492.
- Chen, B., Liu, X. and Tong, S. (2007). Adaptive Fuzzy Output Tracking Control of MIMO Nonlinear Uncertain Systems, *IEEE Transactions on Fuzzy Systems* **15**(2): 287 – 300.
- Chen, B. S., Peng, S. C. and Wang, K. C. (2000). Traffic Modeling, Prediction and Congestion Control for High-Speed Networks: A Fuzzy AR Approach, *IEEE Transactions on Fuzzy Systems* **8**(5): 491–508.
- Chen, B.-S., Yang, Y. S., Lee, B.-K. and Lee, T.-H. (2003). Fuzzy adaptive predictive flow control of ATM network traffic, *IEEE Transactions on Fuzzy Systems* **11**(4): 568–581.
- Cherry, S. (2005). Seven myths about voice over IP, *IEEE Spectrum* **42**(3): 52–57.
- Ditze, M. and Jahnich, I. (2005). Towards end-to-end QoS in service oriented architectures, *IEEE International Conference on Industrial Informatics INDIN '05*, pp. 92 – 97.
- Dumont, G. A. and Fu, Y. (1993). Non-linear adaptive control via Laguerre expansion of Volterra kernels, *Int. J. Adaptive Control and Signal Processing* **7**: 367–382.
- Durresi, A., Sridharan, M. and Jain, R. (2006). Congestion control using adaptive multilevel early congestion notification, *International Journal of High performance Computing and Networking* **4**(5).
- Habib, I. W. and Saadawi, T. N. (1992). Access Flow Control Algorithms in Broadband Networks, *Military Communications Conference* **1**: 252–256.
- Hatano, T., Shigeno, H. and Okada, K. (2007). TCP-friendly Congestion Control for HighSpeed Network, *IEEE International Symposium on Applications and the Internet (SAINT)*, pp. 10–14.
- Jacobson, V. (1995). Congestion Avoidance and Control, *ACM SIGCOMM Computer Communication Review* **25**: 157–187.
- Karnik, A. and Kumar, A. (2005). Performance of TCP congestion control with explicit rate feedback, *Networking, IEEE/ACM Transactions on* **13**(1): 108–120.
- Lee, I. W. C. and Fapojuwo, A. O. (2005). Stochastic processes for computer network traffic modeling, *Computer Communications* **29**: 1–23.
- Ninness, B. and Gustafsson, F. (1995). Orthonormal bases for system identification, *Proc. of 3rd European Control Conference*, Roma, Itália, pp. 13–18.
- Oliveira, G. H. C., Campello, R. J. G. B. and Amaral, W. C. (1999). Fuzzy models within orthonormal basis function framework, *IEEE International Fuzzy Systems Conference Proceedings*, Seoul, Korea.
- Ouyang, C.-S., Lee, W.-J. and Lee, S.-J. (2005). A TSK-type neurofuzzy network approach to system modeling problems, *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part B* **35**(4): 751–767.
- Ramakrishnan, K. K. and Jain, R. (1990). A binary feedback scheme for congestion avoidance in computer networks, *ACM Transactions on Computer Systems* **8**(2): 158 – 181.
- Sugeno, M. and Yasukawa, T. (1993). A Fuzzy-Logic-Based Approach to Qualitative Modeling, *IEEE Trans. Fuzzy Systems* **1**: 7–31.
- Vieira, F. H. T. and Ling, L. L. (2009). Adaptive wavelet-based multifractal model applied to the effective bandwidth estimation of network traffic flows, *IET Communications* **3**: 906–919.
- Vieira, F. H. T. and Rocha, F. G. C. (2011). An adaptive fuzzy model using orthonormal basis functions based on multifractal characteristics applied to network traffic control., *Neurocomputing (a ser publicado)* .
- Zhang, H., Yang, M., Yang, O. W. and Mouftah, H. (2000). Design of proportional congestion control for high-speed network swith variable delays, *IEEE International Conference on Communications ICC*, New Orleans, LA, USA, pp. 1435 – 1439.