Controle *Fuzzy* Adaptativo de Fluxos para o Escalonamento de Dados na Transmissão *Downlink* LTE

Álisson A. Cardoso, Flávio H. T. Vieira e Flávio G. C. Rocha

***Resumo*— Neste trabalho, apresentamos um sistema de controle de fontes para sistemas *downlink* LTE. Para tal, propomos uma equação derivada a partir da modelagem *fuzzy* para a taxa ótima de controle que permite minimizar o atraso na fila virtual de espera dos usuários. Resultados em termos de Vazão, Atraso, Taxa de Perda e Taxa de Ocupação da Fila são apresentados em comparação a outros modelos apresentados na literatura, verificando a eficiência da adição do algoritmo de controle *fuzzy* proposto ao escalonamento LTE.**

***Palavras-Chave*— Controle de Taxas de Fluxos, LTE, Lógica *Fuzzy*, Taxa Ótima de Controle.**

***Abstract*— In this paper, we present a flow rate control system for the downlink in LTE systems. Thereby, we propose an equation based on the fuzzy modeling to find the optimal control rate to minimize the delay in the virtual queues of users. Results in terms of Throughput, Delay, Byte Loss Rate, Buffer Occupancy Rate and Fairness are presented in comparison to others methods presented in the literature, verifying the effciency of adding the proposed fuzzy control algorithm to the LTE scheduling.**

***Keywords*— Congestion Control, LTE, Fuzzy Logic, Optimal Control Rate.**

I. Introdução

A alta demanda de taxas, provocadas pelo crescimento das aplicações multimídias, tem impulsionado a busca por tecnologias que atendam essa demanda. Nesse intuito surgiu o sistema LTE (*Long Term Evolution*), criado para fornecer altas taxas de dados, baixa latência, acesso rádio otimizado por pacotes e flexibilidade de implementação de largura de banda. Uma das ferramentas que permitem tais características é o uso da Multiplexação por Divisão de Frequência Ortogonal (OFDM) nas transmissões de dados, garantindo uma maior liberdade no escalonamento de canal e no gerenciamento flexível dos recursos de rádio.

A solução adotada neste trabalho está relacionada com a aplicação da modelagem *fuzzy* visando a predição do comportamento de fila no *buffer* virtual dos usuários no *eNodeB* e o controle da taxa dos fluxos de tráfego no sistema *downlink* LTE destinados aos usuários móveis. Neste tipo de abordagem, um fator importante para o sucesso de evitar o congestionamento é a aplicação de uma modelagem de tráfego adequada. Quanto mais precisa for a estimação do comportamento dos fluxos da rede, mais apropriado será o serviço oferecido ao usuário. Por outro lado, se o modelo não for capaz de representar precisamente o tráfego real, o desempenho real da rede pode ser subestimado ou superestimado. Assim, um modelo de tráfego eficiente deve capturar fielmente as características do tráfego de redes. 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 [1].

Este trabalho está divido na seguinte forma: apresentamos os trabalhos relacionados na seção II. Na seção III, esclarecemos a estrutura do *downlink* do Sistema LTE e o algoritmo de escalonamento utilizado. Na sequência, apresentamos a modelagem do sistema de controle de taxas de fluxos e apresentamos o modelo *fuzzy* de predição utilizado. Na seção VI, apresentamos o cálculo da taxa ótima de controle baseada no modelo *fuzzy*. Na seção VII, apresentamos a simulação e os resultados obtidos. Na seção seguinte, concluimos este trabalho.

II. Trabalhos Relacionados: Controle de Fluxos

Em [2], os autores propõem um algoritmo de escalonamento para sistemas *downlink* LTE levando em consideração o tamanho da fila virtual de cada usuário. Assim, usuários que apresentem maiores filas terão maior prioridade em comparação aos demais. Ainda em [2], os autores também propõe o emprego de algoritmos de controle de taxas de fluxos para controlar o tráfego de rede que não seja sensível ao atraso (melhor esforço). Os resultados apresentados pelos autores mostram que o uso dos algoritmos apresenta significante melhora no tempo de espera nas filas virtuais.

Outros trabalhos apresentam propostas de esquemas de controle que são dedicados aos protocolos de redes, como [3], ou baseados nos mecanismos de controle de taxas de fluxos do protocolo TCP/IP (Transmission Control Protocol/Internet Protocol), como em [4]. Entre as propostas de controle de taxas de fluxos que não dependem de mecanismos específicos de rede, destacamos o método de Controle Proporcional [5], sendo o mesmo apresentado em [3]. Tais métodos podem ser utilizados para controle de aplicações de tempo real e são também eficazes para outros problemas de controle. Assim, usaremos estes métodos nas análises comparativas deste trabalho.

Álisson A. Cardoso e Flávio H. T. Vieira, Escola de Engenharia Elétrica, Computação e Mecânica, Universidade Federal de Goiás, Goiânia-GO, Brasil. Flávio G. C. Rocha, Instituto de Informática, Universidade Federal de Goiás, Goiânia-GO, Brasil. E-mails: alsnac@gmail.com, flavio@emc.ufg.br e flavio@inf.ufg.br. Este trabalho foi parcialmente financiado pela Capes.

III. Estrutura do *Frame* LTE e o Modelo do Sistema

Nesta seção, apresentamos a estrutura do *Frame* LTE e do modelo do sistema para o cálculo da taxa dos usuários.

A. *Estrutura do* Frame *LTE*

A estrutura do *frame* LTE, apresentada na Figura 1, mostra a composição de um *frame* de rádio utilizado na comunicação *downlink* do LTE. O *slot* básico de tempo, possui uma duração de $0.5ms$, onde se pode ter sete ou seis símbolos, dependendo da utilização de prefixo cíclico normal ou estendido.

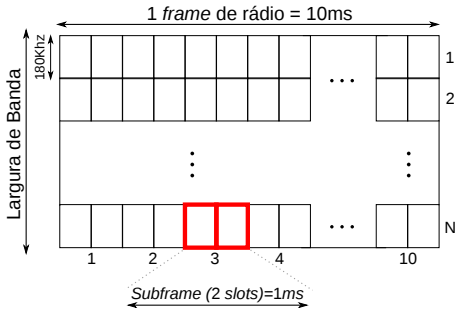

Fig. 1. Estrutura de recurso tempo-frequência básico do LTE.

Definimos cada *slot* de tempo como sendo um bloco de recurso (RB - *Resource Block*). No domínio da frequência, esse bloco de recurso possui uma largura de banda igual a $180kHz$, onde são agrupados 12 subportadoras de $15kHz$. Dois blocos de recurso formam o bloco de escalonamento (SB - *Scheduling Block*), possuindo assim, o tempo de duração de $1ms$.

B. *Modelo e Escalonamento do downlink do Sistema LTE*

No sistema de transmissão *downlink* LTE os blocos de escalonamento são alocados para se realizar a transmissão de dados entre o *eNodeB* e o equipamento usuário. Assim a qualidade da transmissão é diretamente dependente da qualidade do canal ao qual é realizada a comunicação. Sendo assim, a estrutura do LTE permite a escolha entre alguns esquemas de modulação (MCS-*Modulation and Coding Scheme*), com o objetivo de otimizar a transmissão de acordo com esse canal. Assim, na rede LTE o índice CQI (*Channel Quality Indicator*) é definido em termos de taxa de códigos e esquema de modulação e possui a informação de qual MSC deve ser adotado para transmissão.

A comunicação entre o *eNodeB* e os usuários necessita trocar não só dados, como também, sinais de controle e sinais pilotos. Assim, algumas subportadoras são atribuídas a essa finalidade, resultando no uso de apenas $N_{sc}^{(d)}$ das N_{sc} portadoras.

Definimos a taxa de bits alcançada por um único SB, dado o esquema de modulação MCS j, pela seguinte equação:

$$r^{(j)} = \frac{R_j^{(c)} \log_2(M_j)}{T_s N_s} \sum_{s=1}^{N_s} N_{sc}^{(d)}(s) \tag{1}$$

onde T_s é a duração de um símbolo OFDM, N_s a quantidade de símbolos OFDM consecutivos no tempo, M_j o tamanho da constelação utilizado no esquema de modulação MSC e R_k a taxa de código associada com o $MCS_j \in \{1, 2, \ldots, J\}$.

Sabendo que o vetor $g_k = [g_{k,1}, \ldots, g_{k,n}]^T$ representa o CQI para o usuário k e que $G = [g_1, \ldots, g_k]^T$ o CQI para os K usuários nos N SBs, temos que o máximo CQI do usuário k para todos SBs é dado por:

$$n^* = argmax(g_{k,n}), \text{ onde } n \in N \tag{2}$$

Assim $q_{k,max(g_{k,n^*})} \in \{1, 2, \ldots, J\}$ é o maior índice MCS alcançado pelo usuário k no n-ésimo SB. Considerando que cada SB é atribuído exclusivamente a um único usuário, durante a duração de um TTI (*Transmission Time Interval*). Definimos $\rho_{k,n}$ como o indicador atribuído valor $\rho_{k,n} = 1$ para o usuário k alocado no n-ésimo SB e $\rho_{k,n} = 0$ para o caso contrário. Definimos $b_{k,j}$ o indicador da escolha do MCS do usuário k para todos SBs alocados em um *subframe*, então a taxa de dados (bits/s) em um *subframe* pode ser dada por:

$$r_k = \sum_{n=1}^{N} \rho_{k,n} \sum_{j=1}^{q_{k,max(g_{k,n^*})}} b_{k,j} r^{(j)} \tag{3}$$

A taxa de dados total resultante em um TTI, pode ser obtida pela seguinte equação:

$$\sum_{k=1}^{K} \sum_{n=1}^{N} \rho_{k,n} \sum_{j=1}^{q_{k,max(g_{k,n^*})}} b_{k,j} r^{(j)} \tag{4}$$

Objetivando maximizar a taxa de dados total em um TTI , algoritmos de escalonamento dos SBs são propostos. Podemos citar [6], o qual propõe um algoritmo de escalonamento para rede *downlink* LTE, onde requisitos de QoS são levados em consideração na hora de definir as prioridades para escolha dos blocos de escalonamento de cada usuário.

Outros trabalhos, como o proposto em [7], propõe maximizar a equação 4 através do emprego da técnica de otimização por enxame de partículas (PSO - *Particle Swarm Optimization*). Apesar de apresentar um vazão superior aos algoritmos comparados em [7], o algoritmo PSO se mostra oneroso pela quantidade de iterações realizadas no processos de adaptação do enxame (população). Em razão dessa característica dificultar a aplicação do algoritmo para processamento em tempo real em sistemas LTE, neste trabalho é avaliado o algoritmo Qos Garantido, proposto em [6] em comparação a nossa proposta.

IV. Descrição do Sistema de Controle de Taxas de Fluxos

Nessa seção, detalhamos o sistema implementado de controle de taxas de transmissão de fluxos. Este sistema de controle visa prever adaptativamente o comportamento da fila no *buffer* e, a partir dos parâmetros do modelo de predição de tráfego, controlar a taxa da fonte de tal forma

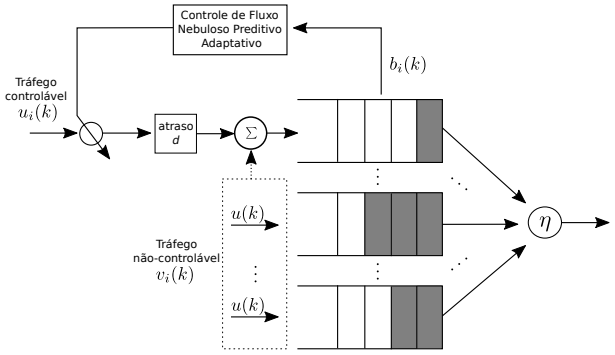

Fig. 2. Modelo do Sistema de Controle de Taxas de Fluxos.

que o tamanho da fila no *buffer* seja igual ou inferior ao nível de referência desejado.

- Fluxo de tráfego controlável $\mu_i(k)$ para o usuário i;
- Fluxo de tráfego não-controlável $\nu_i(k)$ para o usuário i;
- Atraso de realimentação (*round-trip time*) d;
- Tamanho da fila no *buffer* $b_i(k)$ no instante k para o usuário i;
- Capacidade η do enlace de saída do sistema;
- Nível desejado para o tamanho da fila no *buffer* b_i^{τ} para o usuário i;

O esquema de controle proposto em [8] realiza ajuste de taxas de transmissão dos fluxos visando um tamanho de fila desejável para cada fonte individuadamente. Esse controle individual faz com que o usuário usufrua da banda restante sem um conhecimento do tamanho da fila das outras fontes, o que dependendo do caso pode piorar o desempenho da rede. Neste trabalho, propomos um novo modelo para controle de taxa de fluxos que leva em consideração o tráfego das outras fontes do sistema.

Definimos o tráfego não-controlável, pela seguinte equação:

$$\nu_i(k) = u_1(k)+\ldots+u_{i-1}(k)+u_{i+1}(k)+\ldots+u_m(k) = \sum_{j=1;j\neq i}^{m} u_j(k) \tag{5}$$

A Equação 5 mostra que o tráfego não-controlável utilizado pelo algoritmo *fuzzy* na realização do controle da fonte i, será a soma do tráfego controlável de todos as fontes restantes, permitindo uma visualização geral do quão congestionado a rede se encontra.

O esquema de controle de tráfego proposto tem como objetivo levar em consideração o atraso de *round-trip* d prevendo o comportamento da ocupação do *buffer* a fim de evitar ocorrência de congestionamento. Para isto, desenvolvemos um algoritmo adaptativo de predição de d passos a frente do tamanho da fila no *buffer* $b_i(k+d)$ baseado nas informações passadas e atuais da taxa da fonte controlável $\mu(s)_{s\leq k}$ e do tamanho da fila no *buffer* $b(s)_{s\leq k}$. Além disso, para obter um atraso de espera na fila do *buffer* o mínimo possível, aplicamos a taxa ótima de controle proposta $\mu_i^o(k)$ (ver seção VI) para regular a taxa da fonte controlável i. Deste modo, é possível confinar a taxa de perda de bytes dentro dos níveis estabelecidos no contrato de tráfego por causa do tamanho da fila controlado de forma a minimizar o atraso.

V. Preditor LMS Fuzzy

Considere o vetor de entrada $[x(k)]$ com $x(k) \in U \equiv [C_1^-, C_1^+] \times [C_2^-, C_2^+] \ldots [C_n^-, C_n^+] \subset R^n$ onde U representa o espaço das amostras de entrada do filtro e R^n o espaço do vetor de saída $[d(k)]$, sendo $k = 0, 1, 2, \ldots$ o instante de tempo.

O problema se torna encontrar um filtro adaptativo $f_k : U \subset R^n \to R$ tal que a seguinte equação:

$$L = E[(d(k) - f_k(x(k)))^2] \tag{6}$$

seja minimizada.

O projeto do filtro adaptativo LMS Fuzzy descrito por [9], segue os seguintes passos:

- **Passo 1:** Defina M conjuntos *fuzzy* F_i^l para cada intervalo $[C_i^-, C_i^+]$ do espaço de entrada U, com sua função de pertinência sendo:

$$\mu_{F_i^l} = exp[-\frac{1}{2}(\frac{x_i - \bar{x}_i^l}{\sigma_i^l})^2] \tag{7}$$

- **Passo 2:** Construa um conjunto de regra SE-ENTÃO da seguinte forma:

$$R^l = \begin{cases} \text{Se } x_1 \text{ é } F_1^l \text{ e} \ldots \text{e } x_n \text{ é } F_n^l \\ \text{Então } d \text{ é } G^l \end{cases} \tag{8}$$

onde $x = [x_1, \ldots, x_n]^T \in U$, $d \in R$ e F^l definida no passo 1, com sua função de pertinência $\mu_{F_i^l}$.

- **Passo 3:** Construa o filtro adaptativo, que é equivalente a expansão do *fuzzy basis function* (FBF) [9], representado pela equação:

$$f_k(x) = \frac{\sum_{l=1}^{M} \theta^l (\prod_{i=1}^{n} \mu_{F_i^l}(x_i))}{\sum_{l=1}^{M} (\prod_{i=1}^{n} \mu_{F_i^l}(x_i))} \tag{9}$$

- **Passo 4:** Utilizando o algoritmo definido em [10], atualize os parâmetros θ^l, $\bar{x}_i^l$ e σ_i^l.

O algoritmo adaptativo para treinamento dos parâmetros θ^l, $\bar{x}_i^l$ e σ_i^l do modelo *Fuzzy* apresentado em [9] é utilizado neste trabalho. Este algoritmo de treinamento é adaptativo, ou seja, permite que os valores dos parâmetros sejam atualizados no decorrer do tempo.

VI. Cálculo da Taxa Ótima de Controle de Taxas de Fluxos

Nesta seção, como parte do esquema de controle de taxas de fluxos adaptativo proposto, apresentamos uma expressão para o cálculo da taxa ótima de controle para regular a taxa $\mu(k)$ da fonte controlável a partir da minimização da função custo J abaixo:

$$J(k+d) = E\left[\frac{b_i(k+d)}{\eta} + \frac{\lambda}{2}(\mu_i(k) - R_{i;min})^2\right], \tag{10}$$

onde $E[.]$ denota a esperança matemática. Na equação (10), a função custo J leva em consideração o tempo de espera do *buffer*, dado por $\frac{b_i(k+d)}{\eta}$. Buscando o atendimento

de taxas mínimas $R_{i;min}$ para o usuário i, adicionamos a segunda expressão na soma, na forma do operador de Lagrange λ.

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 $b_i(k)$ no *buffer* d passos à frente é fornecida pela saída do preditor *fuzzy* proposto quando aplicado à predição de amostras deste processo pela equação 9, sendo:

$$f_k = b_i(k+d) \tag{11}$$

Derivando a equação (10) em função de μ, obtemos:

$$\frac{\partial J}{\partial \mu} = \frac{\partial b_i(k+d)}{\eta \partial \mu} + \lambda(\mu - R_{i;min}) = 0 \tag{12}$$

Em [9, p. 31] encontramos a derivada $(\partial b(k+d)/\partial \mu)$, dada pela equação:

$$\frac{\partial f_x}{\partial \mu} = \frac{\theta^l(k-1) - f_k}{c(k-1)} a^l(k-1) \frac{\mu(k) - \bar{\mu}^l(k-1)}{(\sigma^l(k-1))^2} \tag{13}$$

Através das equações 13 e 12, chegamos ao valor da taxa ótima de controle μ:

$$\mu_i^o = R_{i:min} - \frac{1}{\lambda\eta}\left[\frac{\theta^l(k-1) - f_k}{c(k-1)} a^l(k-1) \frac{\mu_i(k) - \bar{\mu_i}^l(k-1)}{(\sigma^l(k-1))^2}\right] \tag{14}$$

VII. Avaliação do Desempenho do Controle de Taxas de Fluxos

Foram realizadas simulações considerando os dados da Tabela I e séries reais de tráfego TCP/IP, que representam o tráfego entre a Universidade de *Waykato* e o resto do mundo. As séries podem ser encontra em http://wand.net.nz/wits/waikato/8/.

Os valores obtidos nas simulações são resultados da média temporal de 1000 TTIs. Foi considerado um modelo de canal *Rayleigh* e de perda de percurso de $128,1 + 37,6\log(R)\ dB$, com sombreamento log-normal, com média 0 e desvio padrão de 10dB [11], sendo R igual a 1,2Km, que representa a distância dos usuários em relação a estação base.

TABELA I
Configuração do Sistema LTE

Número total de subportadoras	300
Número de SBs	25
Símbolos OFDM por Slot	7
Tamanho do Canal	5Mhz
Frequência da Portadora	2 Ghz
Modo de Transmissão	SISO (*Single Input Single Output*)
Ganho da Antena no eNodeB	$15dBi$
Ganho da Antena do Usuário	$0dBi$
Potência de transmissão do eNodeB	$43dBm$
Modelo do Canal	*Rayleigh*
Máximo Doppler	$30Hz$
Dispersão Temporal	$5us$
TTI simulados	1000

O seguinte método é utilizado em comparação ao algoritmo proposto: Controle de Taxas de Fluxos Proporcional (*Proportional Flow Rate Control*) - Esse método de controle de taxas de fluxos monitora o tamanho da fila no *buffer* e usa esse valor para regular a taxa da fonte controlável através de uma variável de controle $c(k)$ [5].

Seja b^τ o valor de referência de controle do tamanho da fila no *buffer* em um enlace. O sinal de controle da taxa de tráfego $c(k)$ é gerado através do seguinte algoritmo de controle de taxas de fluxos :

$$c(k) = \begin{cases} 1.002 & \text{se } b(k) < 0.998b^\tau \\ 1.002 - \frac{b(k)-0.998b^\tau}{b^\tau} & \text{se } 0.998b^\tau < b(k) < 1.002b^\tau \\ 0.998 & \text{se } b(k) > 1.002b^\tau \end{cases} \tag{15}$$

Sendo $\mu(k)$ a taxa da fonte controlável no instante k, então a taxa da fonte para o instante seguinte será dada por $\mu(k+1) = c(k)\mu(k)$. Neste trabalho é considerado uma fila virtual de tamanho 1 $MByte$ para cada usuário e o tamanho desejável da fila b^τ como sendo 30% do tamanho total, ou seja, $b^\tau = 0.3\ MByte$.

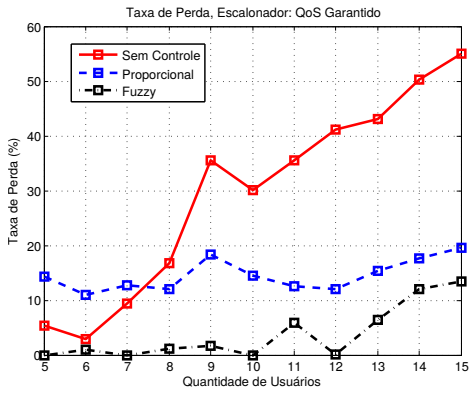

Fig. 3. Taxa de perda em relação a quantidade de usuários em 1000 TTIs.

Na Figura 3, visualizamos os resultados na comparação do método Proporcional, do *Fuzzy* e do sistema sem controle de taxas de fluxos, para a taxa de perda em relação a quantidade de usuários. Podemos observar, que o sistema sem controle apresentou as maiores perdas, seguido pelo método proporcional. Destaca-se valores menores de perdas para o algoritmo *fuzzy* proposto.

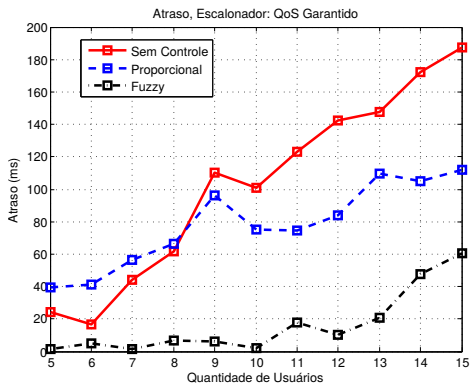

Fig. 4. Atraso na fila (ms) em relação a quantidade de usuários em 1000 TTIs.

Os resultados do atraso, dado em ms em relação a quantidade de usuários, pode ser observado na Figura 4. Nota-se que o sistema sem controle e o método proporcional apresentaram valores de atraso superior em comparação ao controle de taxas de fluxos *fuzzy* proposto, destacando-se com valores inferiores a 60 ms.

Na Figura 5, visualizamos os resultados obtidos para a taxa da ocupação da média das filas dos usuários. Notamos menores valores para o algoritmo proposto, com taxas de ocupação da fila com valores inferiores a 40%.

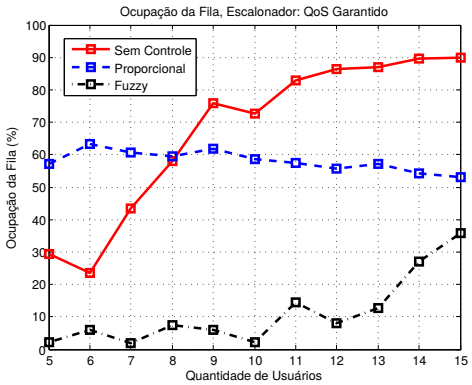

Fig. 5. Taxa de ocupação média da fila em relação a quantidade de usuários em 1000 TTIs.

Na Figura 6, visualizamos os resultados obtidos para o índice de justiça [12]. Notamos os maiores valores para o algoritmo proposto, em comparação aos métodos levados em consideração.

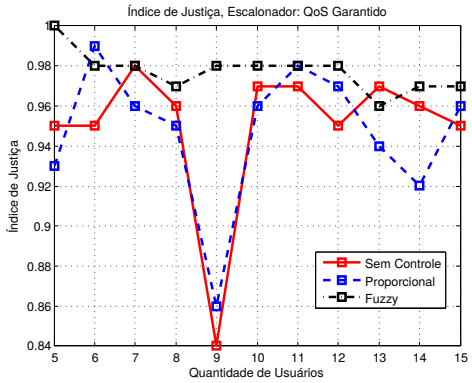

Fig. 6. Taxa de ocupação média da fila em relação a quantidade de usuários em 1000 TTIs.

Os resultados de Vazão obtidos, pela simulação do sistema *downlink* LTE é apresentado na Figura 7. Nota-se que os algoritmos apresentaram valores de vazão similares, com destaque para a obtenção dos maiores valores pelo algoritmo QoS Garantido. Pode-se observar que em alguns pontos, como em 9 e 14 para a quantidade de usuários, o algoritmo *Fuzzy* proposto apresenta uma vazão superior em relação aos demais algoritmos comparados.

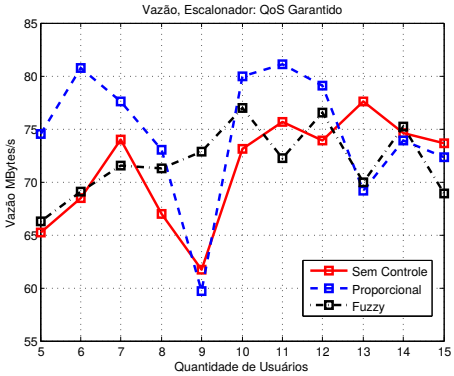

Fig. 7. Vazão ($MBytes/s$) em relação a quantidade de usuários em 1000 TTIs.

VIII. Conclusão

Neste trabalho apresentamos um sistema de controle de fontes para o *downlink* de sistemas LTE, demostrando uma equação, obtida da modelagem *fuzzy*, para a obtenção da taxa ótima de controle que permite minimizar o atraso na fila virtual de espera dos usuários.

Os resultados mostram que o controle de fontes *fuzzy* proposto se mostra superior aos métodos comparados em termos de taxa de perda, atraso, ocupação média da fila e índice de justiça, sem que ocorra uma degradação substancial da vazão do sistema *downlink* LTE.

Referências

[1] C.-S. Ouyang, W.-J. Lee, and S.-J. Lee, "A TSK-type neuro-fuzzy network approach to system modeling problems," *Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics, IEEE Transactions on*, vol. 35, no. 4, pp. 751–767, Aug 2005.

[2] A. Zolfaghari and H. Taheri, "Queue-aware channel-adapted scheduling and congestion control for best-effort services in lte networks," *Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering*, vol. 38, no. 2, pp. 170–182, 2015.

[3] H. Mzoughi, F. Zarai, M. S. Obaidat, and L. Kamoun, "3gpp lte-advanced congestion control based on mih protocol," *IEEE Systems Journal*, vol. PP, no. 99, pp. 1–11, 2015.

[4] C. Wang, J. Liu, B. Li, K. Sohraby, and Y. Hou, "LRED: A Robust and Responsive AQM Algorithm Using Packet Loss Ratio Measurement," *Parallel and Distributed Systems, IEEE Transactions on*, vol. 18, no. 1, pp. 29–43, Jan 2007.

[5] I. Habib, and T. Saadawi, "Access flow control algorithms in broadband networks," *Computer Communications*, vol. 15, no. 5, pp. 326–332, 1992.

[6] N. Guan, Y. Zhou, L. Tian, G. Sun, and J. Shi, "Qos guaranteed resource block allocation algorithm for lte systems," in *2011 IEEE 7th International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob)*, 2011, pp. 307–312.

[7] L. Su, P. Wang, and F. Liu, "Particle swarm optimization based resource block allocation algorithm for downlink lte systems," in *2012 18th Asia-Pacific Conference on Communications (APCC)*, 2012, pp. 970–974.

[8] F. Vieira and F. Rocha, "An adaptive fuzzy model using orthonormal basis functions based on multifractal characteristics applied to network traffic control," *Neurocomputing*, vol. 74, no. 11, pp. 1894–1907, 2011.

[9] L.-X. Wang, *Adaptive Fuzzy Systems and Control: Design and Stability Analysis*. Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice-Hall, Inc., 1994.

[10] S. M. Kuo, B. H. Lee, and W. Tian, *Real-Time Digital Signal Processing: Fundamentals, Implementations and Applications*. John Wiley & Sons, 2013.

[11] 3GPP, "R 36.942 version 10.2.0 radio frequency (rf) system scenarios," Evolved Universal Terrestrial Radio Access (EUTRA), Tech. Rep., 2011.

[12] Raj Jain, A. Durresi, G. Babic. "Throughput Fairness Index: An Explaination". Department of CIS, The Ohio State University, ATM_Forum/99-0045, 1999.