

Algoritmo de Escalonamento de Pacote com Policiamento de Tráfego para Alocação de Recurso em Redes LTE Downlink

Jeanette Quiñones Ccorimanya e Lee Luan Ling

Resumo—Neste artigo, melhoramos o desempenho dos escalonadores de pacotes no sistema LTE (*Long Term Evolution*) para aplicações de serviços multimídia, utilizando algoritmos de policiamento de tráfego conhecidos como reguladores de balde furado. Pretendemos alcançar a equidade entre as classes de serviços, controlando as taxas de chegada dos pacotes nas filas de transmissão do escalonador. Os resultados das simulações mostram que os escalonadores com tráfego de entrada policiado fornecem melhor desempenho para serviços em tempo real, especialmente para tráfegos de vídeo. A avaliação do desempenho foi realizada em termos de parâmetros de qualidade de serviço, como atraso médio, vazão média e taxa de perda de pacotes para tráfegos de Vídeo e VoIP.

Palavras-Chave—Evolução a Longo Prazo (LTE), Policiamento de Tráfego, Escalonador de Pacote, Qualidade de Serviço (QoS)

Abstract—In this paper, we improve the performance of packet scheduling in LTE system for multimedia service applications using traffic policing algorithms known as leaky bucket controllers. We achieve fairness between classes of service, the arrival rates of packets to transmission queues of the scheduler. Simulation results show that schedulers with policed input traffic provide better performance for real-time services, specially for video traffic. The performance evaluation was carried out in terms of quality of service parameters, such as average delay, average throughput and packet loss ratio for Video and VoIP traffic.

Keywords—Long Term Evolution (LTE), Traffic Policing, Packet Scheduler, Quality of Service (QoS)

I. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a crescente demanda de usuários que utilizam dispositivos móveis para o acesso a Internet tem levado a um aumento na demanda por tráfego de dados em tempo real. Nesse contexto, a indústria de telecomunicações sem fio tem definido uma nova interface aérea de comunicações móveis chamada de LTE (*Long Term Evolution*), padrão de comunicação promovida pelo 3GPP (*3rd Generation Partnership Project*) que fornece altas taxas de dados, baixa latência e acesso via rádio otimizado por pacotes. O sistema LTE emprega a tecnologia de acesso múltiplo OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing Access*) na transmissão *downlink*, onde uma banda larga é dividida em múltiplas subportadoras ortogonais, sendo as informações transmitidas em forma paralela, permitindo um gerenciamento flexível dos recursos de rádio [1]. A rede de acesso RAN (*Radio Access*

Network) do LTE chamada de E-UTRAN (*Evolved Universal Terrestrial Access Network*) é composta principalmente por estações bases eNodeB (*Evolved Node B*) [2] onde são executadas todas as funções da gestão de recursos de rádio RRM (*Radio Resource Management*). Uma das funções mais importantes do RRM é a alocação dinâmica de recursos de rádio para os usuários em direção *downlink* executada pelo escalonador de pacotes (do inglês *Packet Scheduler*). O escalonador de pacote é responsável por selecionar cuidadosamente os usuários (UE) e transmitir seus pacotes para que os recursos da interface aérea sejam efetivamente utilizados. Neste artigo, propõe-se melhorar o desempenho dos algoritmos de escalonadores M-LWDF (*Modified Largest Weighted Delay First*) e EXP/PF (*Exponential Proportional Fair*) do sistema LTE para aplicações de serviço multimídia, usando algoritmos de policiamento de tráfego, com o objetivo de minimizar o atraso de pacotes do sistema LTE mantendo uma taxa de transferência desejável. Neste trabalho comparamos o desempenho dos escalonadores estudadas através dos parâmetros de qualidade de serviço para aplicações de tráfego em tempo real como Vídeo e VoIP em termos de Atraso Médio, Vazão Média e Taxa de Perda de Pacotes. O artigo está estruturado da seguinte forma. Na Seção II apresentamos os algoritmos de policiamento de tráfego. Na Seção III descrevemos o procedimento de alocação de recursos em redes LTE *downlink*. Na Seção IV propomos um novo algoritmo de alocação de recursos em redes LTE. A Seção V é dedicada à investigação experimental e análise de desempenho dos algoritmos de escalonadores. Finalmente, concluímos na Seção VI.

II. ALGORITMO DE POLICIAMENTO DE TRÁFEGO

O algoritmo de policiamento de tráfego é uma ferramenta importante na arquitetura da rede. Ele permite a entrada de uma quantidade de pacotes na rede somente se a conexão de fluxo de tráfego estiver bem-comportada. Caso contrário, os pacotes de entrada deverão ser descartados ou marcados como de baixa prioridade [3]. Nesta seção, descrevemos alguns dos principais algoritmos de policiamento de tráfego estudados na literatura.

A. Balde Furado (*Leaky Bucket - LB*)

O mecanismo de controle de algoritmo de balde furado (LB) pode ser interpretado como um teste sequencial para analisar o comportamento de um fluxo de tráfego de entrada a fim de estabelecer e ajustar a conformidades de transmissão de dados

Jeanette Quiñones Ccorimanya e Lee Luan Ling, Departamento de Comunicação da Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação, Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Campinas, Brasil, E-mails: jeanetqc@decom.fee.unicamp.br, lee@decom.fee.unicamp.br. Este trabalho teve apoio da CNPq (PEC-PG).

[4][3]. Este algoritmo LB é descrito na Figura 1 onde mostra a analogia conceitual entre o sistema de armazenamento de água de balde furado e um esquema de transmissão de fila, onde o balde furado modifica o processo de fluxo de entrada por armazenamento e em função de taxa de fluxo de saída determinada pelo tamanho do furo [5]. Além disso, quando o balde estiver cheio, o vazamento do balde (*buffer*) causará a perda de água (dados). Se assumimos que o balde esteja inicialmente vazio ($t=0$), a quantidade máxima de trabalho processado pelo balde furado é dado por:

$$LB(t) = \bar{a}t + S \quad (1)$$

onde t é o instante de tempo, \bar{a} é a média do tráfego de entrada e S o tamanho do balde (*buffer*).

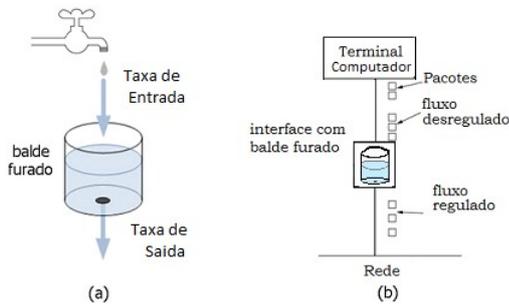


Fig. 1. (a) Controle de água de balde furado (b) Controle de tráfego de balde furado

B. Balde Furado Fractal (Fractal Leaky Bucket - FLB)

O balde furado fractal (FLB) é um mecanismo de policiamento introduzido em [6] baseado no conceito de modelagem fBm (fractional Brownian motion). A quantidade máxima de trabalho aceito caracterizado pelo processo envelope de balde furado fractal é dado pela equação:

$$FLB(t) = \bar{a}t + k\sigma t^H + S \quad (2)$$

onde H é o parâmetro de Hurst [7], σ representa o desvio padrão e k é a constante relacionada a probabilidade de violação do processo envelope, dada pela equação [8]:

$$k = \sqrt{-2\ln\varepsilon} \quad (3)$$

O algoritmo FLB também pode ser visto como um teste sequencial descrito pelo seguinte conjunto de equações:

$$E_n = \max\{0, E_{n-1} + X_n - \bar{a}\Delta\} \quad (4)$$

$$K_n = \begin{cases} S, & \text{if } E_n = 0; \\ k\sigma\Delta^H [n^H - (n-1)^H] + K_{n-1} & \end{cases} \quad (5)$$

$$J_n = \begin{cases} 0, & \text{if } E_n \leq K_n; \\ X_n - \bar{a}\Delta - k\sigma\Delta^H [n^H - (n-1)^H] & \end{cases} \quad (6)$$

onde a sequência J_n representa o número de pacotes marcados com prioridade baixa ou que serão descartados, E_n é uma sequência de testes, K_n é o limiar de decisão adaptativa para E_n , J_n é o controle que o algoritmo exerce na entrada da sequência aleatória X_n e Δ é o intervalo de tempo.

C. Balde Furado Multifractal (Multifractal Leaky Bucket - MLB)

O Mecanismo de Policiamento de Chegada Multifractal (MAPM) foi introduzido em [3] usando um processo envelope conhecido como Processo de Chegada com Limitante Multifractal (MFBAP) [7], representado pela equação:

$$MFBAP(t) = \bar{a}t + k\sigma t^{H(t)} + S \quad (7)$$

onde $H(t)$ é o expoente de Hölder [9]. Os demais parâmetros são semelhantes aos do algoritmo anterior.

$$E_n = \max\{0, E_{n-1} + X_n - \bar{a}\Delta\} \quad (8)$$

$$K_n = \begin{cases} S, & \text{if } E_n = 0; \\ k\sigma\Delta^{H(t)} [n^{H(t)} - (n-1)^{H(t)}] + K_{n-1} & \end{cases} \quad (9)$$

$$J_n = \begin{cases} 0, & \text{if } E_n \leq K_n; \\ X_n - \bar{a}\Delta - k\sigma\Delta^{H(t)} [n^{H(t)} - (n-1)^{H(t)}] & \end{cases} \quad (10)$$

III. ALOCAÇÃO DE RECURSOS EM SISTEMAS LTE DOWNLINK

A alocação de recursos em sistemas LTE cuida os aspectos dos requerimentos de QoS, empregando algoritmos adequados para o escalonamento de pacotes [10].

Todo o processo de alocação de recursos para cada usuário na transmissão *downlink* é realizado em uma sequência de operações que calcula uma métrica para cada fluxo que pode ser alocado. Assumimos que a métrica atribuída ao fluxo i no sub-canal j -th é denotado por $w_{i,j}$, esta métrica pode ser analisado como sendo a prioridade de transmissão de cada usuário em um recurso de bloco específico.

A Figura 2 mostra os principais blocos funcionais do RRM onde cada escalonador de pacote atua em cada intervalo de tempo de transmissão (TTI) e alocam recursos para os usuarios segundo as métricas de prioridade específica [10].

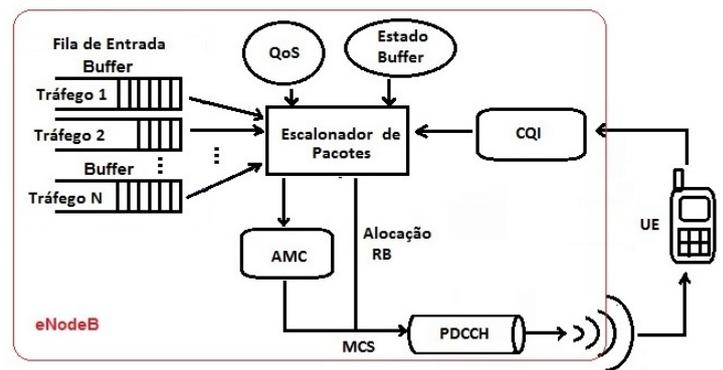


Fig. 2. Os blocos funcionais de RRM do LTE

A. Escalonador Modified Largest Weighted Delay First - M-LWDF

O algoritmo de escalonamento M-LWDF foi desenvolvido para suportar múltiplos dados de usuários com diferentes requerimentos de QoS (*Quality of service*) [11], que prioriza os fluxos de tempo real com maior atraso considerando a melhor

condição do canal. A métrica atribuída é dada pela seguinte expressão:

$$w_{i,j} = -\frac{\log \delta_i}{\tau_i} \cdot D_{HOL,i} \frac{r_{i,j}}{\bar{R}_i} \quad (11)$$

onde τ_i é o valor limite de atraso de pacote suportado pela aplicação do usuário i , δ_i é definido como a taxa de perda de pacotes tolerável para o usuário i , $r_{i,j}$ denota a taxa de dados instantâneos disponível, \bar{R}_i é a taxa média de dado suportado pelo canal, $D_{HOL,i}$ representa o atraso *Head of Line* (HOL) que calcula o atraso do primeiro pacote na fila do *buffer* a ser transmitido.

B. Escalonador Exponential Proportional Fair - EXP/PF

O escalonador EXP/PF foi desenvolvido para aumentar a prioridade de fluxos em tempo real respeitando os fluxos em tempo não real. A métrica atribuída é dada pela seguinte expressão [11]:

$$w_{i,j} = \exp\left(\frac{\alpha_i D_{HOL,i} - \lambda}{1 + \sqrt{\lambda}}\right) \frac{r_{i,j}}{\bar{R}_i} \quad (12)$$

$$\alpha_i = \frac{\log \delta_i}{\tau_i} \quad (13)$$

$$\lambda = \frac{1}{N_{rt}} \sum_{i=1}^{N_n} \alpha_i D_{HOL,i} \quad (14)$$

onde N_{rt} representa o número de fluxos em tempo real ativo na direção *downlink*.

IV. ALGORITMO DE ALOCAÇÃO DE RECURSO PROPOSTO

Em ambientes de redes sem fio, foram propostos diversos algoritmos de escalonamento de pacotes para melhorar o seu desempenho em serviços de tempo real, assim como minimizar o atraso, maximizar a taxa de transmissão ou minimizar a taxa de perdas. No entanto, a maioria dos escalonadores existentes na literatura não podem satisfazer vários requerimentos de qualidade de serviço simultaneamente.

Neste trabalho propomos o melhoramento do desempenho dos algoritmos de escalonadores M-LWDF e EXP-PF do sistemas LTE para aplicações de serviço multimídia, usando algoritmos de policiamento de tráfego também conhecido como regulador de balde furado.

Os algoritmos de policiamento de tráfego empregados em [12] analisam o desempenho da fila em termos de taxa de perda de um sistema sem fio baseado em OFDM, levando em consideração o comportamento multifractal de tráfego sem fio.

Conforme descrito na seção 2, os escalonadores M-LWDF e EXP-PF tomam decisões de escalonamento com base nos atrasos atuais dos pacotes, usando as informações do atraso HOL em cada fila de transmissão. O HOL denota a diferença de tempo entre a hora atual e a hora em que o pacote chegou na fila de transmissão (*buffer*). A Figura 3 mostra o modelo da fila de transmissão da eNodeB desenhado para obter informação do atraso HOL.

Definimos $P_{HOL,i}$ para ser o atraso HOL do *buffer* policiado no fluxo i dado pela seguinte expressão:

$$P_{HOL,i} = \frac{Q_{D-P,i}(t)}{r_i(t)} \quad (15)$$

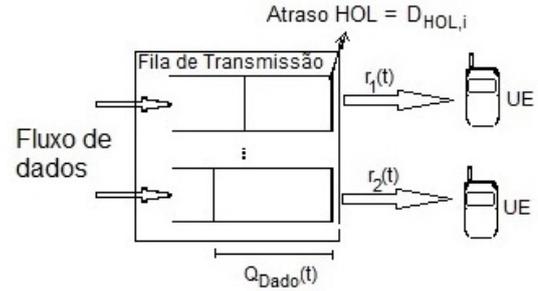


Fig. 3. Modelo da fila de transmissão da eNodeB

onde $Q_{D-P,i}(t)$ representa o número de pacotes acumulados na fila de transmissão para i usuários no tempo t e $r_i(t)$ denota a taxa de dados máximo suportáveis.

Então usamos os algoritmos dos escalonadores M-LWDF e EXP/PF com $D_{HOL,i}$ sendo substituído por $P_{HOL,i}$ respetivamente,

$$w_{i,j}^{(p)} = -\frac{\log \delta_i}{\tau_i} P_{HOL,i} \frac{r_{i,j}}{\bar{R}_i} \quad (16)$$

$$w_{i,j}^{(p)} = \exp\left(\frac{\alpha_i P_{HOL,i} - \lambda}{1 + \sqrt{\lambda}}\right) \frac{r_{i,j}}{\bar{R}_i} \quad (17)$$

$$\lambda = \frac{1}{N_{rt}} \sum_{i=1}^{N_n} \alpha_i P_{HOL,i} \quad (18)$$

onde $w_{i,j}^{(p)}$ denota a nova métrica policiada atribuída ao fluxo i no sub-canal j -th.

V. ESTRUTURA DE SIMULAÇÃO E RESULTADOS

Considera um cenário de uma única célula de 1km de rádio, com interferência celular e número de usuários variando de 10 a 40 movendo-se aleatoriamente a uma velocidade de 3km/h dentro da célula. Os fluxos de dados são distribuídos como seguem: 40% dos usuários usam fluxos de vídeo, 40% dos usuários usam fluxos de VoIP e os 20% restantes usam fluxos de melhor esforço. A Tabela I lista os principais parâmetros usados no simulador LTE-Sim [13].

Para o fluxo de Vídeo um aplicativo foi usando gerando traços de vídeo realistas com taxa de bits de 242kbps [14]. Para fluxos de VoIP um fluxo de voz G.729 com taxa de bits de 8.4kbps foi considerado. O fluxo de voz é gerado através de uma cadeia de Markov ON/OFF [13].

A. Resultados Numéricos

Os gráficos de desempenho do sistema proposto são divididos em dois grupos: para fluxo de Vídeo e para fluxos de VoIP. Os parâmetros de desempenhos avaliados são: atraso médio, taxa de perda de pacotes e vazão média.

• Fluxos de Vídeo

A Figura 4 apresenta o atraso médio de pacotes para fluxos de vídeo. Note-se que o atraso aumenta com o incremento dos usuários para todos os escalonadores. Entretanto, para todos os escalonadores de EXP/PF o atraso chega até 23ms em 40 usuários, oferecendo o melhor desempenho em comparação com os escalonadores de M-LWDF.

TABELA I
PARÂMETROS DE SIMULAÇÃO EM LTE

Parâmetros	Valor Utilizado
Tempo de simulação	150s
Duração de Simulação	120s
Largura de Banda	10MHz
Duração de Slot	0.5ms
TTI	1ms
Número de RBs	50
Mobilidade	3km/h
Escalonador	M-LWDF, EXP/PF
Estrutura de Frame	FDD
Número de Usuários	10, 15, 20, 25, 30, 35, 40
Vídeo	Taxa de 128kbps
VoIP	Taxa de 8,4kbps
Simulador	LTE-Sim e Matlab

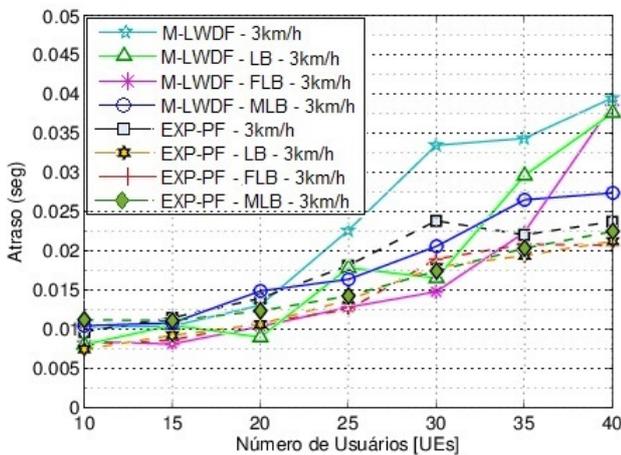


Fig. 4. Atrazo médio de pacotes para fluxo de Vídeo

O desempenho da vazão média para fluxo de vídeo é mostrado na Figura 5. À medida que o número de usuários aumenta a vazão média do fluxo de vídeo diminui relativamente para todos os algoritmos de escalonadores. Os desempenhos dos escalonadores EXP/PF e EXP/PF-MLB são quase os mesmos, mostrando praticamente um mesmo depreciação lenta em comparação dos outros escalonadores.

A Figura 6 mostra que a taxa de perda de pacote para fluxo de vídeo, permanece estável abaixo de 10% para todos os escalonadores quando o número de usuário é inferior a 20. A taxa de perda cresce rapidamente quando o número de usuário excede a 20. Os escalonadores M-LWDF e EXP-PF-MLB mantêm uma taxa de perda crescente relativamente mais lento em comparação com outros escalonadores.

Finalmente concluímos para fluxos de vídeo com 40 usuários o escalonador M-LWDF-MLB apresenta menor atraso e menor taxa de perda. Por outro lado, o escalonador EXP/PF-MLB apresenta melhor desempenho na simulação com menor atraso, maior vazão e menor perda de pacotes.

• Fluxos de VoIP

O atraso médio para o fluxo de VoIP é mostrado na Figura 7. Observamos que o atraso médio fica estável em 2.3ms para todos os escalonadores quando o número de usuário é inferior a 25, No entanto, o atraso médio cresce para

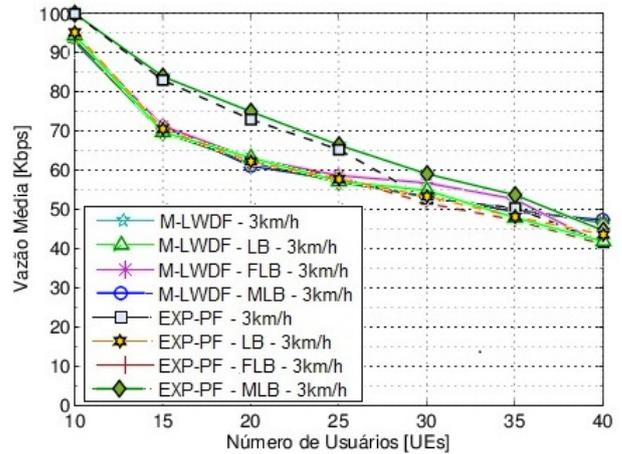


Fig. 5. Vazão média para fluxo de Vídeo

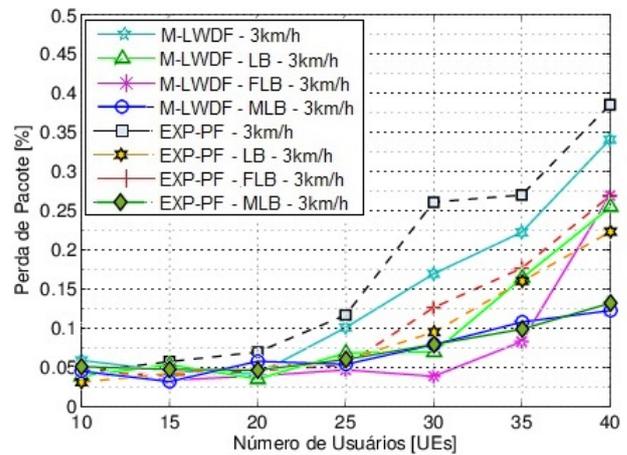


Fig. 6. Taxa de perda de pacotes para fluxo de Vídeo

todos os escalonadores de M-LWDF mais especificamente para o escalonador M-LWDF-MLB que mantém um atraso relativamente mais lenta quando o número de usuário excede a 25.

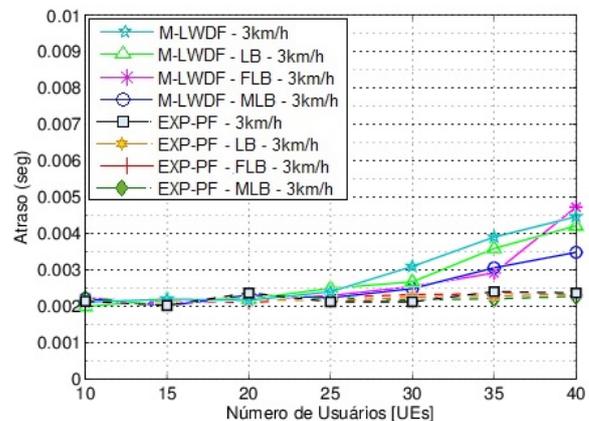


Fig. 7. Atrazo médio para fluxo de VoIP

A Figura 8 apresenta a vazão média para o fluxo VoIP. Note-se que a vazão é quase constante a partir dos 15 usuários para todos os escalonadores. Uma possível explicação para esta não-variação é devido ao modelo de tráfego e aos períodos ON/OFF utilizados na simulação.

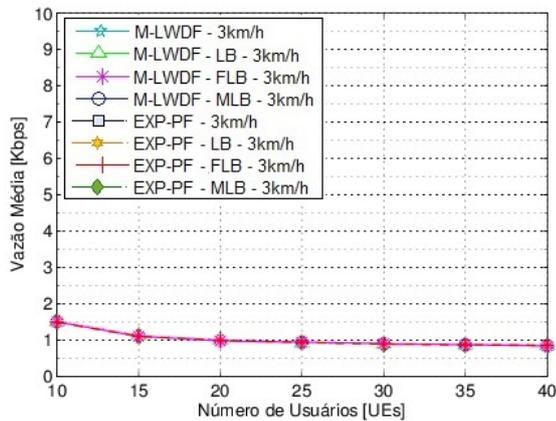


Fig. 8. Vazão média para fluxo de VoIP

A Figura 9 mostra a taxa de perda de pacotes para fluxos de VoIP. Observamos que não existe uma diferença considerável na perda de pacotes para todos os escalonadores.

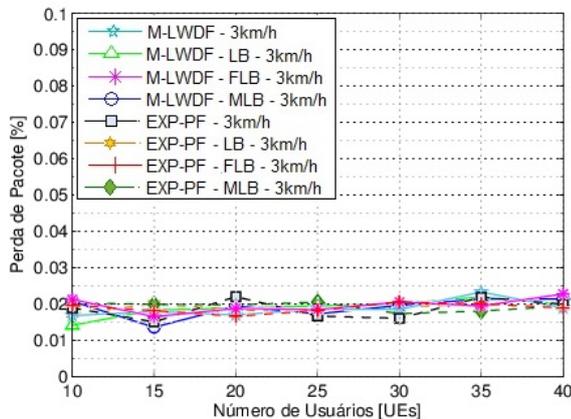


Fig. 9. Taxa de Perda de Pacotes para fluxo de VoIP

VI. CONCLUSÕES

Neste trabalho, concentrou-se principalmente no desempenho dos algoritmos de escalonamento de pacotes para serviços em tempo real no sistema LTE *downlink*, usando algoritmos de policiamento de tráfego, conhecido como regulador de balde furado. Os escalonadores de pacotes escolhidos foram M-LWDF e EXP/PF. Os escalonadores tomam decisões com base nos atrasos atuais dos pacotes, usando as informações do atraso HOL em cada fila de transmissão da eNodeB. Os algoritmos de policiamento de tráfego estudados analisam o desempenho da fila de transmissão, levando em consideração o comportamento fractal (monofractal e multifractal) dos fluxos sem fio. Para avaliar o desempenho dos algoritmos propostos,

foram adotadas três métricas de desempenho: taxa de perdas, atraso médio de pacotes e vazão média. Os resultados das simulações mostraram que os escalonadores de EXP/PF com tráfego policiado apresenta melhor desempenho em termos de atraso de pacotes para fluxos de Vídeo e fluxos de VoIP. Especificamente o escalonador EXP/PF-MLB oferece uma maior vazão em fluxos de vídeo em comparação com os outros escalonadores. Em geral, a alocação de recursos com policiamento de tráfego melhora o desempenho de atraso e vazão dos sistema LTE. Como trabalho futuro, pretendemos desenvolver os algoritmos de policiamento de tráfego em LTE-Advance, assim como outros algoritmos de policiamento complexos serão explorados.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio do Programa Estudante-Convênio de Pós-graduação PEC-PG

REFERÊNCIAS

- [1] 3GPP, Tech. Specific. "Technical Specification Group Radio Access Network; Feasibility Study for orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) for UTRAN enhancement" (3GPP TR 25.892. Release 6).
- [2] 3GPP, Tech. Specific. "LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); Overall description; Stage 2" (3GPP TS 36.300 version 8.9.0 Release 8).
- [3] Junior, Josemar Alves Santos, and Flavio Henrique Teles Vieira. "Estimation of Backlog and Delay in OFDM/TDMA Systems with Traffic Policing Through Network Calculus." IEEE Latin America Transactions 13.3 (2015): 796-803.
- [4] Takada, Hellinton Hatsuo; Anzaloni, Alessandro. "A sequential test approach for policing mechanisms to deal with monofractal and multifractal traffic." In: Next Generation Internet Design and Engineering, 2006. NGI'06. 2006 2nd Conference on. IEEE, 2006. p. 6 pp.-268.
- [5] Tanenbaum, A S. "Redes de Computadores". 4.ed. São Paulo: Campus, 2003.
- [6] Fonseca, Nelson LS, Gilberto S. Mayor, and Cesar AV Neto. "On the equivalent bandwidth of self-similar sources." ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation (TOMACS) 10.2 (2000): 104-124.
- [7] Pereira, Flavio de M., N. L. S. Fonseca, and Dalton S. Arantes. Fractal traffic modeling and policing using envelope process. Technical Report Campinas, SP, Brazil: State University of Campinas, 2006.
- [8] Takada, Hellinton Hatsuo, and Alessandro Anzaloni. "A multifractal traffic policing mechanism." IEEE communications letters 10.2 (2006): 120-122.
- [9] Le Guével, Ronan, and Jacques Lévy Véhel. "Incremental moments and Hölder exponents of multifractional multistable processes." ESAIM: Probability and Statistics 17 (2013): 135-178.
- [10] Capozzi, Francesco, et al. "Downlink packet scheduling in LTE cellular networks: Key design issues and a survey." IEEE Communications Surveys Tutorials 15.2 (2013): 678-700
- [11] M. M. Nasralla and M. G. Martini, "A downlink scheduling approach for balancing qos in lte wireless networks," in Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC), 2013 IEEE 24th International Symposium on, Sept 2013, pp. 1571-1577.
- [12] Vieira, Flávio Henrique Teles, Flávio Geraldo Coelho Rocha, and Josemar Alves dos Santos. "Loss probability estimation and control for OFDM/TDMA wireless systems considering multifractal traffic characteristics." Computer Communications 35.2 (2012): 263-271.
- [13] Piro G., Grieco L. A., Boggia G., Capozzi F., and P. Camarda, "Simulating LTE Cellular Systems: an Open Source Framework", IEEE Trans. Veh. Technol., vol. 60, no. 2, Feb. 2011
- [14] Vídeo trace library. <http://trace.eas.asu.edu/>.