

Avaliação da Qualidade de Vídeo e VoIP em Sistema LTE com diferentes Algoritmos de Escalonamento utilizando Métricas de QoS

Jocksam G. Matos, Jonas P. M. Junior, José A. M. S. Junior e Ananias Neto

Resumo—Este trabalho destaca um estudo comparativo de métricas de Qualidade de Serviço (QoS) em diferentes escalonadores de pacotes, do sistema LTE (Long Term Evolution), propostos para o padrão 3GPP (3rd Generation Partnership Project), nomeadamente PF (Proportional Fair), M-LWDF (Maximum Largest Weighted Delay First) e EXP-PF (Exponential Proportional Fair). A avaliação de desempenho a partir das métricas utilizadas neste trabalho foram: Perda de Pacotes e Vazão. Resultados obtidos a partir de simulação mostram que o escalonador M-LWDF é capaz de prover QoS para um cenário realístico da rede LTE.

Palavras-Chave—Sistema LTE, Avaliação de Desempenho, QoS, Algoritmo de Escalonamento.

Abstract—This work presents a comparative study of Quality of Service (QoS) metrics in different packet schedulers, of the LTE (Long Term Evolution) System, proposed for 3GPP (3rd Generation Partnership Project), namely PF (Proportional Fair), M-LWDF (Maximum Largest Weighted Delay First) and EXP-PF (Exponential Proportional Fair). The performance evaluation from the metrics used in this study are the following: Packet Loss and Throughput. Simulation results have shown that the M-LWDF scheduler is able to provide QoS for a realistic scenario in a LTE network.

Keywords—LTE System, Performance Evaluation, QoS, Scheduling Algorithm.

I. INTRODUÇÃO

O aumento da demanda de novos serviços de telecomunicação ao longo dos últimos anos tem exigido novas aplicações e capacidades de transmissão cada vez maiores; o desafio das novas tecnologias, deste modo, é atender requisitos de Qualidade de Serviço (QoS – *Quality of Service*).

Nas últimas décadas as redes móveis têm permitido grandes avanços e mudanças nos sistemas de comunicação, garantindo maior mobilidade e disseminação de conteúdo. A Tecnologia LTE (*Long Term Evolution*) é a evolução da tecnologia de rede móvel padronizada pelo 3GPP (*3rd Generation Partnership Project*) que utiliza novos sistemas de múltiplo acesso a interface aérea, para prover novos serviços e aplicações de conteúdo, tais como, MMOG (*Multimedia Online Gaming*), TV Móvel, Web 2.0, *streaming* de vídeo, download de músicas e muitos outros [1].

A evolução do LTE, denominado de LTE-Advanced tem como pretensão competir com outras tecnologias de redes móveis, como foi definido pelo ITU-R (*International*

Telecommunication Union Recommendations) [2]. O LTE inclui vantagens significativas em termos de desempenho, destacando-se pela possibilidade de uma capacidade de navegação superior as redes 3G existentes.

Em redes de próxima geração que proporcionam integração de aplicações de conteúdo multimídia como, por exemplo, Vídeo e VoIP (*Voice over Internet Protocol*) é necessário providenciar QoS diferenciado por categoria de tráfego de dados, proporcionando garantias de desempenho das aplicações críticas e ao mesmo tempo promover critérios de justiça no compartilhamento de recursos.

Para atingir esses objetivos, os algoritmos de escalonamento de pacotes são meios indispensáveis, uma vez que determinam controle diferenciado de métricas de QoS. Os escalonadores de pacotes proporcionam gerenciar a fila de pedidos dos serviços, além decidir a ordem do fluxo das aplicações.

Na literatura, vários escalonadores de pacotes são propostos para o padrão 3GPP do Sistema LTE em [3], [4] e [5], sendo eles RR (*Round Robin*), PF (*Proportional Fair*), MT (*Maximum Throughput*), M-LWDF (*Maximum Largest Weighted Delay First*), ATBFQ (*Adaptive Token Bank Fair Queuing*), EXP-PF (*Exponential Proportional Fair*), SB (*Score Based*), entre outros.

A proposta deste trabalho é avaliar o desempenho da tecnologia de rede móvel LTE, baseada em parâmetros de QoS na disseminação de conteúdo multimídia. Avaliar métricas de QoS para o cenário que utilize soluções LTE, com múltiplas células, múltiplos usuários, além de aplicar estratégias de escalonamento de pacotes.

O artigo está organizado da seguinte forma: Na seção II, os trabalhos relacionados são analisados. A seção III aborda às principais características do sistema LTE. Os algoritmos de escalonamento de pacotes propostos para a rede LTE são destacados na seção IV. As simulações e resultados finais são apresentados na seção V. A seção VI apresenta as conclusões e trabalhos futuros.

II. TRABALHOS RELACIONADOS

Nesta seção são destacados os principais trabalhos relacionados com a pesquisa deste projeto. Muitos introduzem conceitos e principalmente boas contribuições sobre a tecnologia LTE e provisão de QoS, entretanto não apresentam uma análise nem uma avaliação conjunta de tráfego de Vídeo

e VoIP associados aos escalonadores de pacotes propostos para a rede LTE.

Em [3] é apresentado um algoritmo de escalonamento *cross-layer*, ATBFQ (*Adaptive Token Bank Fair Queuing*), que foi projetado para o escalonamento de pacotes e alocação de recursos no canal de *downlink* do LTE. Os resultados apresentados demonstram que o algoritmo proposto oferece melhor desempenho em termos de atraso, taxa de descarte de pacotes.

O artigo [4] propõe um estudo no escalonamento de pacotes em um mix de tráfego UTRAN *Long Term Evolution* em canal de *downlink*. O trabalho destaca os algoritmos de escalonamento (RR, MT e PF) que diferem classes de tráfego, além de um escalonador dinâmico de pacotes com classificação de serviço. Resultados da simulação apresentam controle de dados em tipos de tráfego VoIP, os resultados demonstram que VoIP prioriza as necessidade do nó móvel. No entanto, essa prioridade restrita diminui a eficiência espectral.

O artigo [5] investiga o desempenho dos escalonadores de pacotes EXP-PF e M-LWDF na tecnologia LTE para serviços multimídias, *streaming* de Vídeo e serviço Web. A avaliação de desempenho foi realizada em termos de produtividade do sistema e classes de serviços em tempo real e não real, os resultados apontam que o escalonador M-LWDF apresentou um melhor desempenho comparado ao escalonador EXP-PF, para uma alta carga de serviços de usuários, enquanto para uma baixa carga de serviço de usuários, o escalonador EXP-PF apresentou melhor performance.

No trabalho desenvolvido em [6] foi proposto um escalonador com baixa complexidade utilizando o canal de *downlink* LTE, integrando resultados sobre alocação de recursos. Na pesquisa, a simulação abstrai a camada física e modela a camada MAC (*Medium Access Control*). Os resultados apresentados evidenciam que as métricas de QoS podem e devem ser utilizados em um canal de *downlink* para oferecer QoS em um mix de tráfego.

III. SISTEMA LTE

O Sistema LTE é a evolução das redes móveis de próxima geração, apoiada em uma estrutura de comunicação caracterizada pelos excelentes requisitos de desempenho, trata-se de uma rede de banda larga móvel que valoriza fatores como, velocidade de acesso, baixa latência, baixo custo de consumo energia e compatibilidade com tecnologias anteriores [7].

A tecnologia é também denominada de E-UTRAN (*Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network*) que iniciou com o estudo do 3GPP, com o objetivo de aprimorar meios para atingir grandes avanços nos serviços fornecidos e redução de custos.

Como base nesses estudos, o 3GPP determinou um conjunto de metas e requisitos para a evolução desta tecnologia [7], incluindo, por exemplo: Taxas de dados de pico superior a 100 Mbps para a direção de *downlink* e 50 Mbps para a direção de *uplink*; Redução significativa de latência no plano de controle; Prover diferentes tipos de serviços, navegação web, *streaming* de vídeo, VoIP, entre outros; Minimizar custo e consumo de energia; Suporte aprimorado de QoS fim-a-fim; Compatibilidade com sistemas 3G existentes e Maior eficiência espectral.

A. Arquitetura LTE

Basicamente, a arquitetura LTE é uma evolução da tecnologia GSM/WCDMA (*Global System for Mobile Communications/Wideband Code Division Multiple Access*), que é uma tecnologia de rede que leva ao CDMA de Banda Larga, também denominado de UMTS (*Universal Mobile Telecommunications System*) [8]. O sistema LTE possui uma arquitetura de rede móvel baseada no padrão IP, desta forma permite integração com outras tecnologias de comunicação baseadas no protocolo IP.

A arquitetura LTE foi projetada para suportar de forma eficiente, vários tipos de serviços, em especial orientados a pacotes como, por exemplo, VoIP. A arquitetura LTE está dividida, segundo [9], em quatro principais domínios de alto nível: UE (*User Equipment*), E-UTRAN (*Evolved UTRAN*), EPC (*Evolved Packet Core*) e *Services*, conforme ilustra a Figura 1.

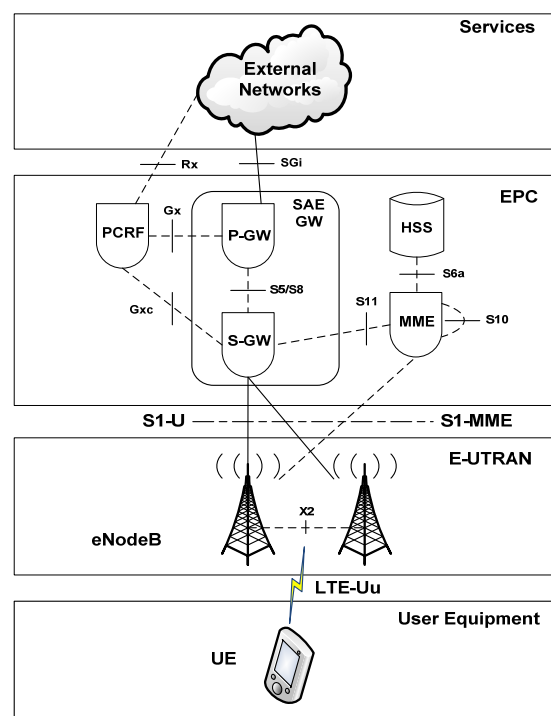


Fig. 1. Arquitetura LTE.

Além da divisão em domínios, a arquitetura é dividida em dois planos, que determinam a pilha de protocolos da arquitetura LTE: plano do usuário, que possui a camada física, camada MAC, RLC (*Radio Link Control*) e PDCP (*Packet Data Convergence Protocol*) e o plano de controle, que contém a RRC (*Radio Resource Control*) que é adicionada às camadas do plano do usuário [7].

IV. ESCALONADORES DE PACOTES

Nesta seção são apresentados os escalonadores de pacotes propostos na literatura para o sistema LTE [5], além de destacar a importância desses escalonadores na provisão de QoS para a tecnologia LTE, permitindo garantias de desempenho dos serviços multimídias.

Com o objetivo de melhorar o provimento de QoS dos sistemas móveis de quarta geração, muitos algoritmos de escalonamentos de dados têm sido propostos na literatura científica com finalidade de obter melhor QoS dos sistemas.

Os principais algoritmos de escalonamento de dados, propostos na literatura, para assegurar a QoS no sistema LTE, são: *Proportional Fair* (PF), *Maximum Largest Weighted Delay First* (M-LWDF) e *Exponential Proportional Fair* (EXP-PF).

Nas próximas subseções serão detalhados alguns destes algoritmos de escalonamento de pacotes utilizados neste trabalho para avaliar o desempenho do sistema LTE, baseado em métricas de QoS, tais como, vazão e perda de pacotes na disseminação de conteúdo multimídia.

A. *Proportional Fair* (PF)

O escalonador de pacotes PF (*Proportional Fair*) é uma das estratégias de escalonamento mais conhecida e pesquisada para a rede LTE [10]. A sua finalidade é proporcionar melhores garantias de QoS, de forma justa para todos os usuários da rede. Este objetivo é maior ainda quando as aplicações utilizam conteúdo multimídia, que são caracterizados por limitações específicas como, por exemplo, atraso e perda de pacotes.

O escalonador de pacotes PF garante que todos os usuários, independente da condição de canal de cada usuário, deverão possuir as mesmas probabilidades de atendimento. Esse procedimento é satisfeito devido ao PF realizar um bom balanceamento entre a vazão e a equidade dos seus usuários. O escalonador de pacotes PF seleciona o usuário com maior razão entre a taxa de dados instantânea e a taxa média de dados transmitidos.

Segundo [11], o escalonador de pacotes PF visa maximizar a razão entre a taxa de dados instantânea do usuário $r_{(i)}$ e a vazão média do usuário $R_{(i)}$, equação (1). O escalonador de pacotes PF atinge uma elevada transferência (alta capacidade) e, ao mesmo tempo mantém a justiça proporcional entre os usuários.

$$w_{(i)} = \frac{r_{(i)}}{R_{(i)}} \quad (1)$$

Na tecnologia LTE, a cada TTI (*Transmission Time Interval*), que corresponde 10 ms de duração, o escalonador PF calcula a métrica para cada fluxo, assumindo que cada fluxo só é escalonado, se e somente se, possuir pacotes de dados para transmitir na camada MAC e o receptor do usuário não está no estado ocioso. Para obter a métrica, o escalonador precisa da taxa de dados instantânea do usuário e da taxa média de dados transmitidos, que é estimada a cada TTI [12].

B. *Maximum Largest Weighted Delay First* (M-LWDF)

O escalonador de pacotes M-LWDF (*Maximum Largest Weighted Delay First*) foi desenvolvido para suportar múltiplos fluxos de dados de inúmeros usuários, atendendo diferentes requisitos de QoS [5], [12]. O M-LWDF prioriza os fluxos com maior atraso, além de considerar a melhor condição de canal em relação aos seus níveis médios.

A métrica é definida considerando um limite de atraso de pacote τ_i , a probabilidade máxima de atraso δ_i , o primeiro pacote a ser transmitida na fila, que excede o limite de atraso W_t , além da razão derivada do escalonador PF, taxa de dados instantânea do usuário $r_{(i)}$ e da taxa média de dados transmitidos $R_{(i)}$, conforme equação (2).

$$w_{(i)} = -\frac{\log \delta_i}{\tau_i} W_t \frac{r_{(i)}}{R_{(i)}} \quad (2)$$

O escalonador de pacotes M-LWDF é utilizado em serviços de tempo real, desta forma, se os pacotes de dados não forem transmitidos antes da expiração da métrica, os pacotes pertencente aos fluxos do usuário são descartados da camada MAC do sistema LTE. Esse procedimento é necessário para evitar desperdício da largura de banda.

C. *Exponential Proportional Fair* (EXP-PF)

O escalonador de pacotes EXP-PF (*Exponential Proportional Fair*) foi desenvolvido para suportar aplicações multimídias com modulação e codificação adaptativa [5], que consiste na técnica de aumentar a capacidade e maximizar a taxa de dados dos sistemas de comunicação móveis, onde os parâmetros de transmissão do sinal, tais como, modulação, taxa de código são dinamicamente adaptados as condições do canal, além de utilizar a multiplexação por divisão de tempo.

A característica principal destas técnicas é que o usuário do sistema pode pertencer a classes de serviços em tempo real como, por exemplo, um *streaming* de vídeo ou a classes de serviços em tempo não real como, por exemplo, *web-browsing*. Desta forma, o escalonador de pacotes EXP-PF é indicado em redes que são caracterizadas por usuários que trafegam diferentes classes de serviços.

Segundo [5] e [12], para um fluxo de dados em tempo real, a métrica considerada é calculada através da equação (3), onde α_i é a relação entre o limite de atraso de pacote e a probabilidade máxima de atraso derivada do escalonador M-LWDF.

$$w_{(i)} = \exp\left(-\frac{\alpha_i W_t - \lambda}{1 + \sqrt{\lambda}}\right) \frac{r_{(i)}}{R_{(i)}} \quad (3)$$

Quando o fluxo de dados no escalonador EXP-PF é caracterizado pela classe de serviço em tempo não real, a métrica considerada no escalonamento é a do escalonador de pacotes PF. Assim como no escalonador de pacotes M-LWDF, se os pacotes de dados não forem transmitidos antes da expiração da métrica, os pacotes pertencente aos fluxos do usuário são descartados da camada MAC do sistema LTE, novamente para evitar desperdício da largura de banda.

V. SIMULAÇÕES E RESULTADOS

Nesta seção são destacados os procedimentos e as descrições do sistema de simulação, bem como os resultados obtidos no desenvolvimento deste trabalho. As simulações foram realizadas no simulador LTE-Sim [12], versão R1, capaz de fornecer análise de desempenho do sistema LTE.

O simulador LTE-Sim é uma ferramenta *open source* que disponibiliza os principais componentes da arquitetura LTE, incluindo o UE, E-UTRAN (eNodeB), EPC (MME/GW – *Mobility Management Entity/Gateway*), além de gerar trace de fluxo de mix de tráfego de Vídeo e VoIP, gerenciamento de QoS por meio de estratégias de escalonamento de pacotes, PF, M-LWDF e EXP-PF.

O cenário simulado é composto de um *cluster* de 7 células, considerando o raio de cobertura de 1 km, incluindo em cada célula, uma eNodeB, um MME e um conjunto de UEs distribuído uniformemente no *cluster* de 7 células em uma variação de 5 – 40 UEs.

As aplicações de Vídeo e VoIP são caracterizadas pela forte exigência de parâmetros a serem atendidos para que o desempenho da aplicação seja satisfatória, neste trabalho, duas

métricas de desempenho da aplicação de Vídeo e VoIP são analisadas neste ambiente de simulação, sendo elas perda de pacotes e vazão.

A caracterização da transmissão de voz no ambiente de simulação é especificado pelo *codec* G.729, com taxa de 8 kbps codificador de voz que se aplica a comunicação multimídia a baixas taxas e complexidade reduzida.

Nas simulações realizadas para a transmissão de vídeo no ambiente de simulação, o padrão de codificação de vídeo utilizado foi o H.264, com taxas de 128 kbps. O padrão H.264 é baseado no MPEG-4 parte 10 AVC (*Advance Video Coding*) e tem características de atingir as maiores eficiências de codificação para diversos tipos de aplicação.

Além das especificações e padrões de Vídeo e VoIP, a Tabela I apresenta os principais parâmetros utilizados na simulação.

TABELA I. PARÂMETROS DE SIMULAÇÃO

Parâmetros	Valor Utilizado
Largura de Banda	10 MHz
Duração	40 Unidades de Simulação
Mobilidade	3 km/h
Escalonador	PF, M-LWDF e EXP-PF
Número de Células	7
Estrutura do Frame	FDD, 10 ms de duração do frame
Raio de Cobertura	1 km
Número de UEs	5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 e 40
Delay Máximo	100 ms
Vídeo	Taxa de 128 kbps
VoIP	Taxa 8 kbps
Fluxo de Vídeo	50 %
Fluxo de VoIP	50 %
Simulador	LTE-Sim R1 e Matlab

Para as métricas coletadas nas simulações utilizou-se um nível de confiança de 95% para análise dos resultados, além de analisar os dados quantitativos das métricas de QoS para perda de pacotes e vazão em sua média, desvio padrão e variância.

A. Avaliação da Qualidade de VoIP e Vídeo no Sistema LTE

A Figura 2 apresenta os valores da porcentagem da perda de pacotes em relação a variação do número de UEs para o sistema LTE, em um *cluster* de 7 células, para os fluxos de VoIP (compreendendo 50 % do fluxo de tráfego), para os escalonadores de pacotes PF, M-LWDF e EXP-PF.

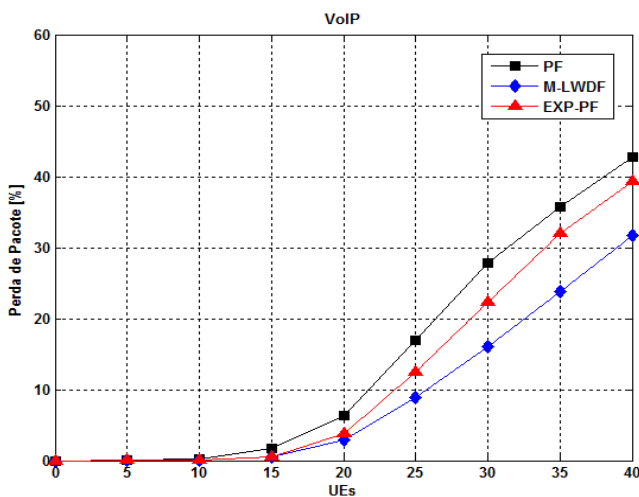


Fig. 2. Perda de Pacotes para o Fluxo de VoIP.

Como pode-se notar, a perda de pacotes permaneceu igualitária para todos os escalonadores de pacotes PF, M-LWDF e EXP-PF, até 15 UEs a perda de pacotes ficou em torno de 0.47 – 1.7 %.

A partir de valores superiores a 20 UEs, nota-se para o fluxo de VoIP um aumento na perda de pacotes, além de diferentes caracterização para os escalonadores, em especial para o PF, que apresentou maior perda em relação aos escalonadores M-LWDF e EXP-PF, para 30 UEs a porcentagem de perda de pacotes foram de aproximadamente 16.07 % para o M-LWDF, 22.35 % para o EXP-PF e 27.78 % para o PF.

Observa-se que com o aumento do número de células no sistema LTE, *cluster* de 7 células, o escalonador M-LWDF apresentou melhor desempenho em comparação aos escalonadores EXP-PF e PF para o serviço VoIP.

Quando há um maior número de células no sistema LTE, a tendência é que o escalonador M-LWDF aloque os recursos do fluxo de VoIP, atendendo a melhor condição de canal em relação aos seus níveis médios, aumentando a capacidade de tráfego. Deste modo, o escalonador M-LWDF apresenta uma redução da perda de pacotes em comparação aos demais.

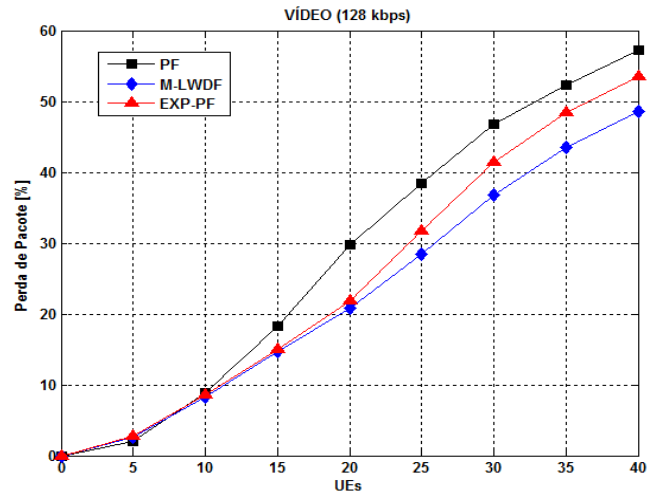


Fig. 3. Perda de Pacotes para o Fluxo de Vídeo.

A Figura 3 apresenta os valores percentuais da perda de pacotes em relação a variação do número de UEs, para o cenário de múltiplas células com fluxo de Vídeo representando 50% do mix de tráfego multimídia.

Observa-se que os valores de perda de pacotes permanecem próximos para todos os escalonadores, entretanto, a partir 20 UEs o escalonador M-LWDF apresenta uma menor variação da perda de pacotes, comparado aos demais escalonadores.

Além da priorização do serviço de Vídeo, o escalonador M-LWDF prioriza a melhor condição de canal, proporcionando maior largura de banda para o cenário de múltiplas células. O escalonador EXP-PF apresenta resultados medianos comparados aos demais escalonadores, devido o escalonador EXP-PF apresentar métricas de priorização de recursos próximas dos dois escalonadores, PF e M-LWDF.

Devido a baixa razão entre a taxa de dados instantânea e a taxa média de dados transmitidos para o fluxo de Vídeo, o escalonador PF não obteve bom desempenho na métrica para alocar os recursos de vídeo, apresentando baixa capacidade de

tráfego. Os valores da vazão para os fluxos de VoIP, que compreende 50 % do mix de tráfego multimídia, em relação ao número de UEs são apresentados na Figura 4.

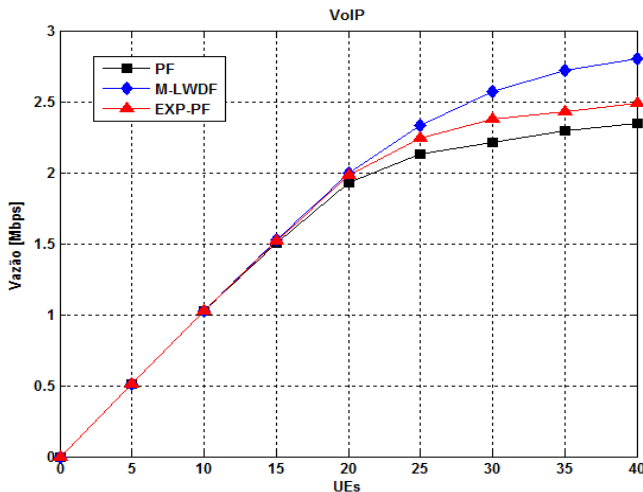


Fig. 4. Vazão para o Fluxo de VoIP.

Pode-se observar, os valores médios da vazão revelam diferenças entre os escalonadores de pacotes, a medida que aumenta a variação do número de UEs, para 35 UEs os valores de vazão média foram aproximadamente 2.72 Mbps para o M-LWDF, 2.42 Mbps para o EXP-PF e 2.29 Mbps para o PF.

Os dados revelam que o escalonador de pacotes M-LWDF apresentou melhor desempenho no fluxo de VoIP, devido a uma baixa porcentagem de perda de pacotes, além da diversidade de células que proporcionou uma melhor condição no canal.

Entretanto, estes resultados destacam que os escalonadores EXP-PF e PF, apesar de possuírem valores médios de vazão abaixo do escalonador M-LWDF, ainda continuam alocando os recursos de forma justa, a medida que aumenta o número de UEs.

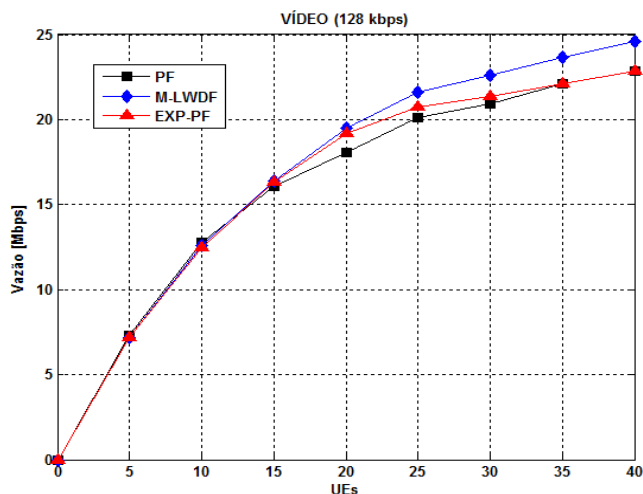


Fig. 5. Vazão para o Fluxo de Vídeo.

Os valores de vazão média referente a 50 % do tráfego de Vídeo, para o cenário com múltiplas células são apresentados na Figura 5. Os dados apresentam como os escalonadores se comportam quando o número de UEs aumenta. Observa-se que os escalonadores PF, M-LWDF e EXP-PF conseguem alocar o

fluxo de Vídeo em níveis relativamente próximos para o sistema LTE.

O escalonador M-LWDF apresenta maiores valores de vazão média, comparado aos demais, confirmando a melhoria na condição de canal, devido ao aumento do número células no sistema LTE. Desta forma, aumentando a capacidade de tráfego de Vídeo.

VI. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

A partir das análises realizadas com os resultados da simulação, para o cenário com múltiplas células, foi observado que as métricas de QoS para o fluxo de VoIP e Vídeo apresentaram melhores níveis para o escalonador M-LWDF.

A diversidade do número de células no sistema LTE possibilitou para o escalonador alocar recursos suficientes para todos os UEs, proporcionando uma melhor condição de canal, conforme observado nas métricas de perda de pacotes e vazão.

Entretanto, as métricas de perda de pacotes e principalmente de vazão revelaram que o escalonador PF, não atendem as recomendações da 3GPP na provisão de QoS para o tráfego de VoIP e Vídeo em cenário de múltiplas células no sistema LTE. Como trabalhos futuros, propõem-se uma avaliação das métricas de QoS para mix de tráfego multimídia em que haja maior nível de mobilidade em cenários com múltiplas células. Outro ponto desafiante será avaliar as métricas de QoE objetivas e subjetivas no que diz respeito a voz e vídeo em redes LTE.

REFERÊNCIAS

- [1] D. McQueen, "The momentum behind LTE adoption", IEEE Communications Magazine, vol. 47, no. 2, pp. 44 - 45, Feb 2009.
- [2] Recommendation ITU-R M.1645, "Framework and overall objectives of the future development of IMT-2000 and systems beyond IMT-2000", Electronic Publication, pp. 22–24, Geneva, 2010.
- [3] F. A Bokhari, H. Yanikomeroglu, W. K. Wong and M. Rahman, "Cross-Layer Resource Scheduling for Video Traffic in the Downlink of OFDMA-Based Wireless 4G Networks", EURASIP Journal on Wireless Com. and Networking, pp. 1–10, 2009.
- [4] J. Puttonen, N. Kolehmainen, T. Henttonen, M. Moisio and M. Rinne, "Mixed Traffic Packet Scheduling in UTRAN Long Term Evolution Downlink", IEEE 19th Inter. Symposium on Personal, Indoor and M. R. Comm. (PIMRC'08), pp. 1–5, Sept., 2008.
- [5] R. Basukala, H. M. Ramli and K. Sandrasegaran, "Performance analysis of EXP/PF and M-LWDF in downlink 3GPP LTE system", in Proc. of First Asian Himalayas Inter. Conf. on Internet (AH-ICI'09), Kathmandu Nepal, pp. 1–5, Nov., 2009.
- [6] B. Sadiq, R. Madan and A. Sampath, "Downlink Scheduling for Multi-class Traffic in LTE", EURASIP Journal on Wireless Comm. and Networking, pp. 1–18, 2009.
- [7] 3GPP TR 36.300 V10.1.0., "Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); Overall description; Stage 2 (Release 10)", 2010.
- [8] T. S. Rappaport, "Comunicações sem fio: princípios e práticas", Pearson Prentice Hall, 2ª Edição, São Paulo, 2009.
- [9] H. Holma and A. Toskala, "LTE for UMTS OFDMA and SC-FDMA Based Radio Access", John Wiley & Sons, 2009.
- [10] E. Dahlman, S. Parkvall, J. Skold, and P. Beming, "3G Evolution HSPA and LTE for Mobile Broadband", Academic Press, 2008.
- [11] L. Suk-Bok, I. Pefkianakis, A. Meyerson, X. Shugong and L. Songwu, "Proportional Fair Frequency-Domain Packet Scheduling for 3GPP LTE Uplink", IEEE Conf., IEEE 28th Conf. on Computer Comm., pp. 2611–2615, Apr., 2009.
- [12] G. Piro, L. A. Grieco, G. Boggia, F. Capozzi and P. Camarda "Simulating LTE Cellular Systems: an Open Source Framework", IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 60, no. 2, pp. 498–513, Feb., 2011.