

Impacto de Critérios de Projeto de Escalonadores LTE *Uplink* na Qualidade de Serviço

Carlos A. Astudillo, Juliana Freitag Borin e Nelson L.S. da Fonseca

¹Instituto de Computação – Universidade Estadual de Campinas
Campinas 13089-971, SP, Brazil

castudillo@lrc.ic.unicamp.br, {juliana,nfonseca}@ic.unicamp.br

Abstract. *This paper studies the impact of design criteria of “two-stage” schedulers for LTE networks on their performance. The study was conducted through the simulation of a “two-stage” scheduler composed by a time-domain scheduler and a frequency-domain scheduler recently proposed in the literature. Simulation results show that the maximum number of users scheduled by the time-domain scheduler and the metric used by the frequency-domain scheduler have important impact on Quality of Service and throughput performance.*

Resumo. *Este artigo apresenta um estudo sobre o impacto de critérios de projeto de escalonadores de “dois estágios” para redes LTE em seu desempenho. O estudo foi realizado através de experimentos de simulação utilizando um escalonador de “dois estágios” composto por um escalonador no domínio do tempo e um escalonador no domínio da frequência recentemente propostos na literatura. Resultados de simulação mostram que o número máximo de usuários escalonados no domínio do tempo e a métrica de escalonamento usada no escalonador do domínio da frequência têm importante impacto no desempenho da rede tanto do ponto de vista da Qualidade de Serviço provisionada quanto da vazão alcançada.*

1. Introdução

Motivado pelo incremento na demanda de serviços de banda larga móvel que requerem altas taxas de dados e suporte de qualidade de serviço, o 3GPP (3rd Generation Partnership Project) especificou a tecnologia *Long Term Evolution* (LTE). Nessa direção, a gerência de recursos de rádio (RRM, *Radio Resource Management*) em redes LTE, bloco localizado na estação base, executa duas tarefas principais: o controle de admissão (RAC, *Radio Admission Control*), que decide sobre a admissão de novas conexões, e o escalonador de pacotes (PS, *Packet Scheduling*), que distribui os recursos entre os usuários. O padrão LTE não define políticas de controle de admissão nem algoritmos de escalonamento específicos, deixados para que os fabricantes de equipamento implementem suas próprias soluções. Como consequência, o controle de admissão e o escalonamento de pacotes em LTE têm atraído a atenção de pesquisadores tanto da academia como da indústria.

Embora tenham sido propostos e estudados vários escalonadores LTE *uplink* no domínio da frequência ([Ruiz de Temino et al. 2008], [Calabrese et al. 2008], [Yang et al. 2010], [Nwamadi et al. 2011]), existem poucos trabalhos na literatura que tratem eles conjuntamente com escalonadores no domínio do tempo ([Astudillo et al. 2013],

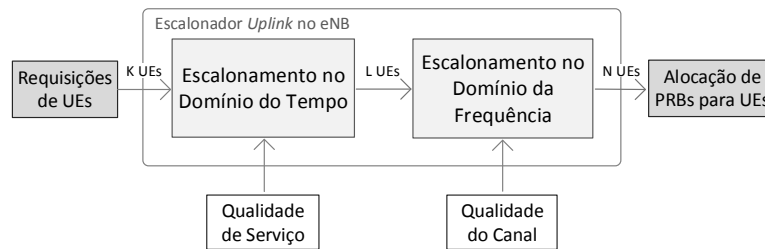


Figura 1. Visão geral do escalonamento *uplink* em redes LTE

[Delgado and Jaumard 2010], [Marwat et al. 2012]). Esse tipo de escalonador é conhecido como de “dois estágios” (*two-stage*), pois dividem a tarefa de escalonamento em duas partes: escalonamento no domínio do tempo (TD, *Time Domain*), que lida com a provisão de QoS, e escalonamento no domínio da frequência (FD, *Frequency Domain*), que tira proveito da diversidade de múltiplos usuários na alocação dos recursos.

O escalonador no domínio do tempo (SCH_{TD}) seleciona um grupo de solicitações de usuários (*User Equipment* - UEs) para serem escalonadas no domínio da frequência, no próximo intervalo de tempo de transmissão (TTI, *Transmission Time Interval*) com base em seus requisitos de QoS. O grupo selecionado é passado para o escalonador no domínio da frequência (SCH_{FD}), que determina os blocos de recursos físicos (PRB, *Physical Resource Blocks*) que devem ser atribuídos aos usuários, baseado principalmente na qualidade do canal e taxa média de transmissão dos usuários. Além de suportar requisitos de QoS, o escalonador no domínio do tempo reduz a complexidade do escalonador no domínio da frequência, limitando o número de pedidos (i.e. usuários) passados para este escalonador, dado que a sua complexidade depende do número de pedidos a serem escalonados. A Figura 1 mostra o conceito básico de escalonamento *uplink* em “dois estágios” em redes LTE.

Delgado e Jaumard [Delgado and Jaumard 2010] propõem dois escalonadores LTE para o sentido *uplink*, chamados de *Single Channel Scheduling Algorithm* (SC-SA) e *Multiple Channel Scheduling Algorithm* (MC-SA). Estes algoritmos utilizam a mesma métrica de escalonamento para selecionar as requisições a serem escalonadas (i.e. usuários) tanto no domínio do tempo como no domínio da frequência. Essa proposta não considera as limitações no canal de controle, dado que, pode atender tantos UEs quantos PRBs disponíveis existam. Segundo [Capozzi et al. 2009], o número máximo de usuários que podem ser escalonados por TTI em cada direção é limitado. Por exemplo, para 10 MHz de largura de banda, em média, somente 10 usuários podem ser escalonados em cada direção, se as limitações do canal de controle forem levadas em conta. Anas *et al.* [Anas et al. 2008] introduz um escalonador no domínio do tempo que leva em consideração o parâmetro de taxa mínima de fluxos de tráfego do tipo taxa de bit garantida (GBR, *Guaranteed Bit Rate*). Este escalonador assume um número máximo de oito UEs escalonados por TTI para uma largura de banda de 10 MHz. No entanto, ele não leva em conta qualquer parâmetro relacionado com o atraso. Mais recentemente, Marwat *et al.* [Marwat et al. 2012] apresenta um escalonador LTE *uplink* chamado de *Bandwidth and QoS Aware* (BQA) que suporta tanto taxa garantida como limiar máximo de atraso e leva em conta as limitações do canal de controle. Para uma largura de banda de 5 MHz supõe-se que no

máximo 5 usuários podem ser escalonados por TTI. Astudillo *et al.* [Astudillo et al. 2013] propõem um escalonador chamado de *Z-Based QoS Scheduler* (ZBQoS), que também suporta requisitos de QoS tanto de taxa de bits como de atraso e leva em consideração as limitações no canal de controle.

Nenhum dos trabalhos mencionados avalia como os critérios de projeto do SCH_{TD} e do SCH_{FD} influenciam a provisão de QoS. O estudo apresentado neste artigo visa responder duas questões relacionadas com o projeto de escalonadores LTE de “dois estágios” e que, pelo conhecimento dos autores, não têm sido abordadas na literatura. A primeira questão procura definir como o número de usuários passados do escalonador no domínio do tempo para o escalonador no domínio da frequência afeta o desempenho da rede (parâmetros de QoS, justiça, vazão da rede, etc). A segunda, por outro lado, visa determinar como a métrica de escalonamento na qual se baseia a alocação dos recursos no domínio da frequência influencia o desempenho da rede.

Para responder essas questões, avalia-se o efeito desses dois critérios de projeto no desempenho de um escalonador de “dois estágios”, que usa no domínio do tempo o escalonador ZBQoS e no domínio da frequência o escalonador FME [Ruiz de Temino et al. 2008] com as métricas mais comuns no domínio da frequência, i.e., *Proportional Fair* (PF) e *Maximum Throughput* (MT).

Este artigo está organizado da seguinte forma. A Seção 2 descreve brevemente os dois escalonadores que compõem o escalonamento *uplink* utilizado nos experimentos. A Seção 3 apresenta detalhes de como os experimentos foram realizados. A Seção 4 analisa os resultados obtidos via simulação. A Seção 5 delinea as conclusões.

2. Escalonamento LTE Uplink de “Dois Estágios” com Suporte a QoS

Esta seção descreve as políticas de escalonamento no domínio do tempo e no domínio da frequência considerados na avaliação de desempenho apresentada neste artigo.

2.1. Escalonador no Domínio do Tempo

No domínio do tempo é usado um escalonador chamado de *Z-Based QoS Scheduler*, recentemente proposto pelos autores deste artigo em [Astudillo et al. 2013]. Esse escalonador é compatível com o padrão de LTE e prioriza os usuários dinamicamente através de uma função *z-shaped* na sua política de escalonamento. O escalonador ZBQoS conta com métricas relacionadas tanto com atraso como com taxa de bits para priorizar os usuários no escalonamento e, graças a sua priorização dinâmica, consegue aumentar a vazão total do sistema sem degradar a QoS fornecida aos usuários.

Baseado nas métricas de escalonamento de QoS, o escalonador ZBQoS seleciona um subconjunto de pedidos de UEs para ser escalonado pelo algoritmo de escalonamento no domínio da frequência no TTI seguinte. O valor da métrica de escalonamento de QoS utilizado para a seleção é o valor mínimo entre a métrica relacionada com o atraso e a métrica relacionada com a taxa. Os *bearers* não-GBR (que de acordo com o padrão, não têm requisitos de taxa mínima) usam apenas uma métrica específica para o tipo de tráfego servido por esta classe, e que está relacionada somente com o atraso.

Primeiramente, o escalonador calcula o valor da métrica de escalonamento para cada UE com transmissões pendentes, a fim de definir a prioridade de cada uma das

requisições. Em seguida, as requisições de banda passante dos UEs são organizadas por ordem decrescente de prioridade. Quanto maior for o valor da métrica, menor será sua prioridade. Depois disso, o escalonador passa no máximo os primeiros UE_{sFD} usuários para o escalonador no domínio da frequência. Esse número máximo de UEs enviados para o escalonador no domínio da frequência, UE_{sFD} , é configurável e deve ser pelo menos igual ao número máximo de usuários que podem ser escalonados por TTI (UE_{TTI}). Finalmente, o algoritmo envia as requisições escolhidas para serem escalonadas no domínio da frequência, quem aloca os recursos para cada usuário. Note que o escalonador no domínio da frequência não escala necessariamente todos os usuários que foram passados pelo escalonador do domínio do tempo.

Maiores detalhes sobre esse escalonador e sobre como as métricas priorizam os diferentes tipo de tráfego podem ser encontrados no trabalho de Astudillo *et al.* [Astudillo et al. 2013].

2.2. Escalonador no Domínio da Frequência

Em cenários com múltiplos usuários, cada um deles pode experimentar diferentes condições de canal e ter diferentes requisitos de QoS. Portanto, uma abordagem comum é levar em consideração as diferentes condições dos usuários ao mesmo tempo em que se provê justiça entre eles, tudo isso sem, no entanto, diminuir drasticamente a vazão total da rede. Algoritmos de escalonamento cientes do estado do canal (*channel-aware scheduling algorithms*) permitem explorar o ganho por diversidade multi-usuários, alocando os recursos entre os usuários de acordo com sua condição de canal.

O escalonador no domínio da frequência recebe como entrada a matriz M (veja Fig. 2), com dimensões $[L \times NPRB]$, onde L é o número de usuários passado pelo escalonador no domínio do tempo e $NPRB$ é o número de $PRBs$ disponíveis. Essa matriz M contém os valores da métrica de escalonamento no domínio da frequência para cada usuário e para cada um dos $NPRB$ blocos de recurso.

Neste artigo, o escalonador utilizado no domínio da frequência é baseado no al-

	PRB1	PRB2	...	PRBNPRB
UE1	M _{1,1}	M _{1,2}	...	M _{1,NPRB}
UE2	M _{2,1}	M _{2,2}		M _{2,NPRB}
⋮	⋮			⋮
UEL	M _{L,1}	M _{L,2}	...	M _{L,NPRB}

Figura 2. Matriz M das métricas de escalonamento no domínio da frequência

Tabela 1. Modelo de tráfego e requisitos de QoS

Serviço	VoIP	Vídeo	CBR
Descrição	G.729 Modelo ON/OFF	H.264 Baseado em trace	1000 Bytes cada 8 ms
Taxa de bit	8.4 Kbps	128 Kbps	1 Mbps
QCI	1	2	8
PDB	100 ms	150 ms	300 ms
GBR	8.4 Kbps	128 Kbps	N/A
Proporção	2 (40%)	2 (40%)	1 (20%)

goritmo FME [Ruiz de Temino et al. 2008]. Esse algoritmo aloca os recursos começando pelo usuário como o maior valor na métrica de escalonamento, e expande a alocação dos PRBs nos dois sentidos da matriz M . Cada UE é considerado como servido quando outro UE com melhor métrica é encontrado.

Uma versão modificada do algoritmo FME (*First Maximum Expansion*) é usada neste artigo. Com o objetivo de aprimorar o desempenho geral do escalonador, uma modificação importante no momento da alocação dos recursos (i.e. atribuição de PRBs) foi utilizada. A versão modificada leva em conta o tamanho atual do *buffer* dos UEs, além da condição atual do canal (no caso da métrica MT) e da vazão dada ao usuário (no caso da métrica PF), no momento da atribuição dos recursos. A inclusão desta condição evita o desperdício desnecessário de recursos, pois é possível que recursos sejam inutilizados por causa da atribuição de recursos além do necessário para um usuário. A versão original do algoritmo FME proposta em [Ruiz de Temino et al. 2008] usa a métrica *Proportional Fair*. Neste trabalho, o algoritmo também foi testado com a métrica de escalonamento *Maximum Throughput* (MT). A versão modificada do algoritmo FME, com a métrica MT no domínio da frequência, encontra-se disponível no código fonte do simulador LTE-Sim [Piro et al. 2011]. As métricas PF e MT foram escolhidas por serem as duas métricas mais usadas no domínio da frequência.

3. Descrição dos Experimentos de Simulação

Nesta seção, avalia-se o impacto do número de usuários passados pelo SCH_{TD} para o SCH_{FD} bem como da métrica usada pelo SCH_{FD} no desempenho do escalonador de “dois estágios” apresentado na Seção 2.

A avaliação de desempenho foi realizada usando o simulador LTE-Sim na sua versão 4.0 [Piro et al. 2011]. LTE-Sim é um simulador de redes LTE baseado em eventos discretos e desenvolvido na linguagem C++. Este simulador é amplamente utilizado para simular funções MAC de LTE. Implementou-se a proposta de escalonador *uplink* e melhorou-se a implementação da parte *uplink* do simulador. Acrescentou-se o suporte para QoS nas transmissões *uplink* e implementou-se a abordagem de escalonamento em “dois estágios”, onde o escalonamento *uplink* se divide em domínio do tempo e domínio da frequência.

O cenário de simulação é composto de uma única célula, com um eNB, e vários

Tabela 2. Parâmetros da simulação

Parâmetro	Valor
Tipo de Sistema	<i>Single Cell</i>
Raio da Célula	0.5 Km
Modelo de Canal	<i>Macro-Cell Urban Model</i>
Número de UEs na Célula	5-150
Velocidade do UE	3 km/h
Largura de Banda do Sistema	5 MHz
Número de Blocos de Recurso	25 (BW por RB: 180 KHz)
Frequência da Portadora	2 GHz
Estrutura do Quadro	FDD
Duração TTI	1 ms
Duração da Simulação	100.000 TTIs (100 Segundos)
Escalonador UL	TD: ZBQoS FD: PF-FME TD: ZBQoS FD: MT-FME
Max. número de UEs passados para o SCH_{FD} (UE_{FD})	5, 7, 9, 11
Max. número de UEs escalonáveis por TTI (UE_{TTI})	5 [Marwat et al. 2012]
Número de Replicações	5

UEs (variando de 5 a 150, com incrementos de 5). Os usuários são uniformemente distribuídos dentro da célula e para cada dois usuários transmitindo tráfego VoIP e dois usuários transmitindo tráfego de vídeo há um usuário transmitindo tráfego CBR. Tráfego de vídeo e VoIP são transmitidos usando *bearers* GBR e o tráfego CBR (tráfego de melhor esforço) usa *bearers* não-GBR. A Tabela 1 resume o modelo de tráfego utilizado nas simulações e seus correspondentes requisitos de QoS e a Tabela 2 resume os principais parâmetros usados na simulação.

Quando o atraso de um pacote é maior do que o *packet delay budget* (PDB) para esse *bearer*, o pacote é descartado. Este processo é realizado pelo UE no início de oportunidade de transmissão. As informações sobre o atraso do pacote no início da fila (HoL, *Head of the Line*) de cada *bearer* são consideradas como disponíveis a cada TTI no eNB.

O efeito do processo HARQ (*Hybrid Automatic Repeat Request*) não é considerado. Além disso, como a avaliação do desempenho concentra-se no escalonador *uplink*, o controle de admissão não é implementado no eNB. Os UEs são distribuídos no início da simulação e permanecem ativos ao longo do tempo de simulação. Além disso, para evitar a interferência do escalonamento intra-UE, assume-se que cada UE tem apenas um *bearer* com uma única classe de tráfego.

Os objetivos principais desses experimentos são: (i) determinar como o número de usuários passados para o algoritmo no domínio da frequência afeta a qualidade de serviço, quando o grupo de usuários a serem escalonados é limitado por um algoritmo de

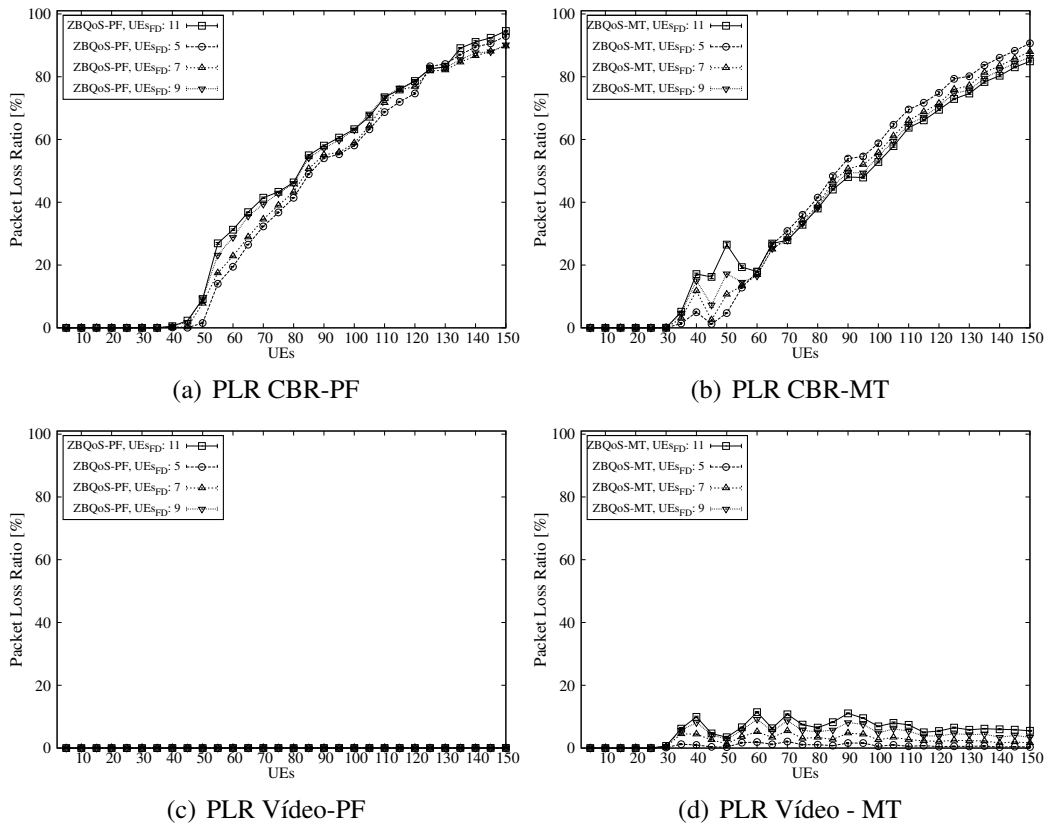


Figura 3. Perda de pacotes do escalonador ZBQoS no domínio do tempo e FME com as métrica PF e MT no domínio da frequência, para vários valores de UEs_{FD}

escalonamento no domínio do tempo que leva em conta qualidade de serviço, como é o caso do escalonador ZBQoS; (ii) avaliar qual métrica de escalonamento no domínio da frequência tem melhor comportamento, quando usado o algoritmo FME para a alocação dos recursos. Resultados comparativos do escalonador aqui descrito (usando métrica PF no FD) com outro escalonador, são apresentados no trabalho de Astudillo *et al.* [Astudillo *et al.* 2013].

4. Resultados da Simulação

Esta seção apresenta os resultados obtidos a partir dos experimentos descritos na seção anterior. Em todos os gráficos, os valores médios são traçados com intervalos de confiança de 95%, e derivados usando o método de replicação independente. O atraso médio (*delay*), a taxa de perda de pacotes (PLR, *packet loss ratio*) e o índice de justiça intra-classes (*intra-class fairness index*) são usados para comparação. Todas estas métricas são apresentadas em função do número de UEs na célula (isto é, carga de tráfego).

Por restrições de espaço, os gráficos referentes ao tráfego de voz foram omitidos, porém, eles apresentam um comportamento similar ao do tráfego de vídeo. A análise feita nessa seção, corresponde à porção do gráfico onde a rede está saturada, isto é, aproximadamente, a partir dos 40 usuários, pois para valores menores as diferenças no desempenho não são representativas. A Fig. 3 mostra a taxa de perda de pacotes para o tráfego de vídeo e CBR. Observa-se que quando a métrica PF é usada, a perda de pacotes para o tráfego CBR aumenta com o número de usuários passados pelo escalonador ZBQoS, enquanto a

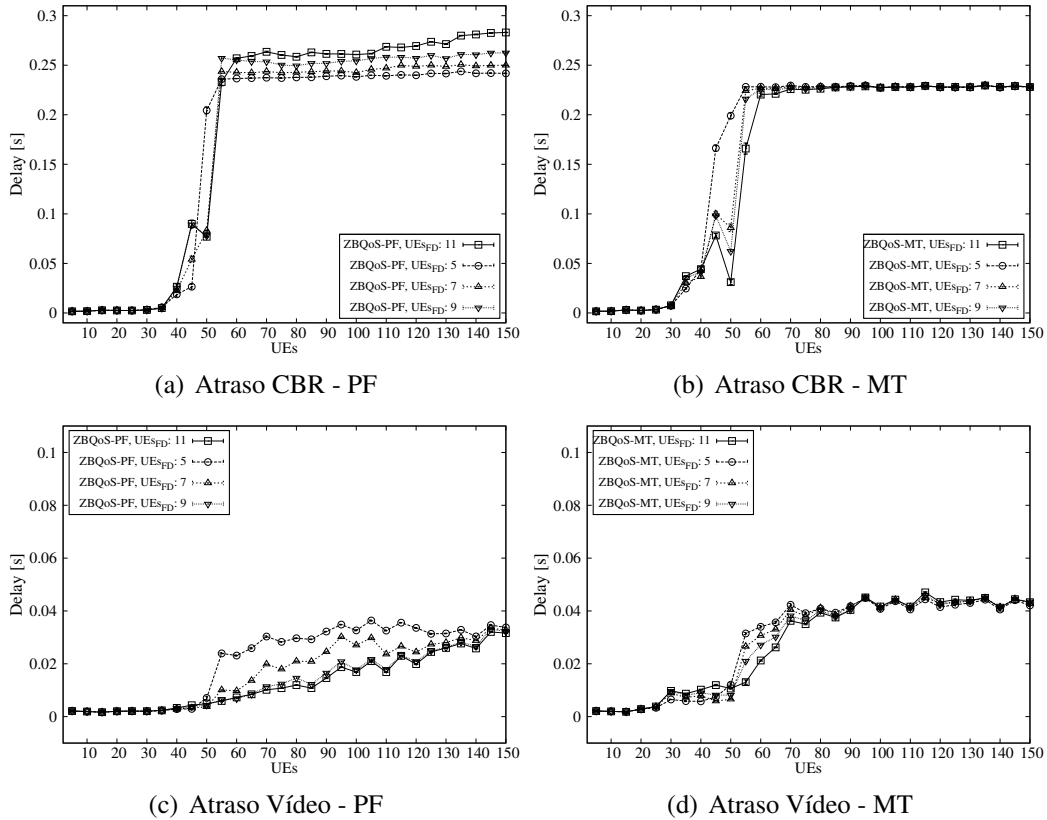


Figura 4. Atraso médio para o escalonador ZBQoS no domínio do tempo e FME com as métrica PF e MT no domínio da frequência, para vários valores de UE_{SFD}

perda de pacotes para o tráfego de tempo real mantém-se nula. Por outro lado, quando a métrica MT é usada, a perda de pacotes diminui com o aumento do número de usuários no domínio da frequência, porém tem-se um impacto muito alto na qualidade de serviço provisionada ao tráfego de tempo real como observado na Fig. 3(d). Como mencionado em [Janevski 2003], 1% é o valor máximo aceitável de PLR para o tráfego de vídeo sem afetar a qualidade de experiência dos usuários. As perdas de pacotes para o tráfego de tempo real, quando UE_{SFD} é maior do que 5 usuários no domínio da frequência, amplamente ultrapassam o valor máximo permitido quando usada a métrica MT. Essa perda de pacotes significativa, deve-se principalmente ao fato de que, quanto maior o valor de UE_{SFD} , maiores são as chances do algoritmo com métrica MT escalonar usuários que não têm requisitos de tempo real, com boas condições de canal, fazendo com que a perda de pacotes do tráfego CBR diminua. Quando um usuário com boas condições de canal é escolhido, um número maior de bytes é transmitido no mesmo intervalo de tempo. Porém, é possível que se diminuam os recursos alocados para usuários de tempo real, o que ocasiona as perdas de pacotes observadas.

A Fig. 4 apresenta o atraso médio para o tráfego de vídeo e CBR. Nota-se que quando usada a métrica MT, o atraso não varia significativamente com o aumento no número de usuários passado para o escalonador no domínio da frequência. Quando usada a métrica PF, o atraso do tráfego de tempo real diminui a medida que aumenta o número de usuários passados para o escalonador no domínio da frequência. Acontece o contrário com o tráfego CBR, quando o atraso no tráfego de tempo real aumenta, o atraso do tráfego

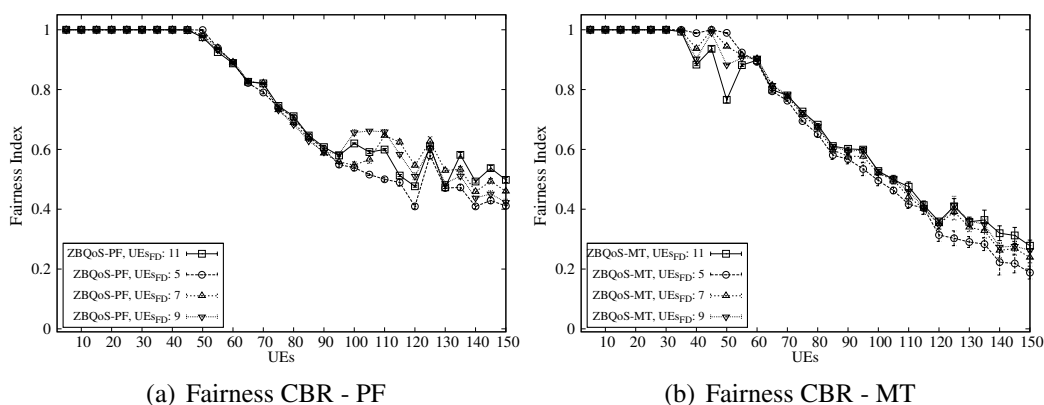


Figura 5. Fairness Index para o escalonador “dois estágios” com métrica de escalonamento PF e MT, para vários valores de UEs_{FD}

que não é de tempo real diminui. Isto é explicado pelo fato de que, menor número de usuários no domínio da frequência, significa que uma maior porcentagem de usuários de tempo real vão estar presentes no domínio da frequência, dado que sua escolha foi realizada por um SCH_{TD} ciente de QoS. O atraso para todos os tipos de tráfego encontra-se bem abaixo do PDB para cada classe.

A Fig. 5 mostra o índice de Jain [Jain 1991] da vazão por *bearer* para usuários com tráfego CBR. Este índice é uma medida da justiça do escalonador, neste caso, entre usuários da mesma classe de serviço, ou seja, o *Intra-Class Fairness Index*. Como era esperado, com a métrica MT, o índice de justiça é menor do que com a métrica PF. Isto se deve ao fato que, usuários sem requisitos de atraso recebem um tratamento mais desigual quando a métrica MT é utilizada. Os gráficos para os outros tipos de tráfego não foram mostradas, pois apresentam um índice próximo de 1 para todos os valores de carga na rede.

5. Conclusão

Este artigo estudou o efeito que alguns critérios de projeto têm na provisão de QoS quando usado um escalonador LTE *uplink* de “dois estágios”. Resultados mostram que a quantidade de usuários passados para o escalonador no domínio da frequência degrada fortemente a qualidade de serviço fornecida aos usuários GBR em rede LTE, quando a métrica de escalonamento MT é usada. Também determinou-se que a taxa de perda de pacotes dos usuários CBR aumenta quando a métrica PF é utilizada, causando uma diminuição na vazão agregada da rede.

Esses resultados são importantes para tomar decisões no projeto de escalonadores LTE de “dois estágios” para provisão de QoS. A escolha desses critérios depende dos objetivos da operadora móvel. Evidencia-se que existe um *trade-off* entre QoS e vazão que precisa ser contornado. Para o escalonador apresentado aqui, concluí-se que o valor ótimo de UEs_{FD} é igual a UE_{TTI} e que a métrica PF tem melhor desempenho que MT, quando visto do ponto de vista de QoS.

Referências

- Anas, M., Rosa, C., Calabrese, F., Pedersen, K., and Mogensen, P. (2008). Combined admission control and scheduling for qos differentiation in lte uplink. In *Vehicular Technology Conference, 2008. VTC 2008-Fall. IEEE 68th*, pages 1–5.
- Astudillo, C. A., Borin, J. F., and da Fonseca, N. L. S. (2013). LTE time-domain uplink scheduler for QoS provisioning. In *IEEE Global Telecommunications Conference*, pages 1480–1485, Atlanta, USA.
- Calabrese, F., Michaelsen, P., Rosa, C., Anas, M., Castellanos, C., Villa, D., Pedersen, K., and Mogensen, P. (2008). Search-tree based uplink channel aware packet scheduling for utran lte. In *Vehicular Technology Conference, 2008. VTC Spring 2008. IEEE*, pages 1949–1953.
- Capozzi, F., Laselva, D., Frederiksen, F., Wigard, J., Kovacs, I., and Mogensen, P. (2009). Utran lte downlink system performance under realistic control channel constraints. In *Vehicular Technology Conference Fall (VTC 2009-Fall), 2009 IEEE 70th*, pages 1–5.
- Delgado, O. and Jaumard, B. (2010). Scheduling and resource allocation for multiclass services in lte uplink systems. In *Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob), 2010 IEEE 6th International Conference on*, pages 355–360.
- Jain, R. (1991). *The art of computer systems performance analysis - techniques for experimental design, measurement, simulation, and modeling*. Wiley professional computing. Wiley.
- Janevski, T. (2003). *Traffic Analysis and Design of Wireless IP Networks*. Artech House, Inc., Norwood, MA, USA.
- Marwat, S., Zaki, Y., Goerg, C., Weerawardane, T., and Timm-Giel, A. (2012). Design and performance analysis of bandwidth and qos aware lte uplink scheduler in heterogeneous traffic environment. In *Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC), 2012 8th International*, pages 499–504.
- Nwamadi, O., Zhu, X., and Nandi, A. (2011). Dynamic physical resource block allocation algorithms for uplink long term evolution. *Communications, IET*, 5(7):1020–1027.
- Piro, G., Grieco, L., Boggia, G., Capozzi, F., and Camarda, P. (2011). Simulating lte cellular systems: An open-source framework. *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, 60(2):498–513.
- Ruiz de Temino, L., Berardinelli, G., Frattasi, S., and Mogensen, P. (2008). Channel-aware scheduling algorithms for sc-fdma in lte uplink. In *Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2008. PIMRC 2008. IEEE 19th International Symposium on*, pages 1–6.
- Yang, H., Ren, F., Lin, C., and Zhang, J. (2010). Frequency-domain packet scheduling for 3gpp lte uplink. In *INFOCOM, 2010 Proceedings IEEE*, pages 1–9.