

# ESCALONADOR DOWNLINK PARA LTE-ADVANCED COM JUSTIÇA

Carlos Pena Langoni, Paulo Roberto Guardieiro

Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Elétrica, Uberlândia – MG  
cplangoni@gmail.com, prguardieiro@ufu.br

**Resumo** - Este trabalho apresenta uma adaptação do escalonador EMBS para que ele tenha bom desempenho em redes com tráfego misto. O EMBS foi desenvolvido para redes LTE-Advanced com *Carrier Aggregation*. Apesar dos bons resultados em uma rede somente com tráfego de vídeo, não teve bom desempenho em justiça quando usuários com *buffer* infinito foram adicionados. Como em redes reais o tráfego é misto, propõe-se um escalonador que procura dar mais justiça nesse cenário.

**Palavras-Chave** - *downlink*, escalonamento, justiça, LTE-Advanced.

## LTE-ADVANCED DOWNLINK SCHEDULER AIMED TO FAIRNESS IN MIXED TRAFFIC

**Abstract** - This paper presents an adaptation for the EMBS downlink scheduler aiming to provide better throughput fairness under mixed traffic environments. EMBS was developed for LTE-Advanced networks with *Carrier Aggregation* and presents good performance for scenarios with only video traffic. However, it does not offer a good throughput fairness, when infinite buffer users are deployed in the cell. Since real life networks present mixed traffic, a new scheduler is proposed to provide a better throughput fairness under these scenarios.

**Keywords** - *downlink*, fairness, LTE-Advanced, scheduling.

### I. INTRODUÇÃO

As redes móveis celulares têm evoluído para atender o grande aumento no número de usuários e as necessidades de taxas de transmissão dos aplicativos. Uma das tecnologias mais recentes para dispositivos móveis conectados é o LTE-Advanced do *3rd Generation Partnership Project* (3GPP) que é uma evolução das redes *Long-Term Evolution* (LTE) e *Universal Mobile Telecommunications System* (UMTS).

Entre as evoluções que o LTE trouxe estão o uso das tecnologias de modulação digital e acesso múltiplo denominadas *Orthogonal Frequency-Division Multiple Access* (OFDMA) no *downlink* e *Single-Carrier Frequency-Division Multiple Access* (SC-FDMA) no *uplink*, que

conseguem, dentre outras vantagens, menores atrasos e robustez ao *fading* e interferências.

Mesmo com essas evoluções o LTE não atingiu os limites de taxa de transmissão estabelecidos pelo *International Mobile Telecommunications-Advanced* (IMT-Advanced) para ser considerado uma rede de quarta geração (4G).

Para isso, o LTE-Advanced surgiu trazendo uma série de evoluções em taxa máxima de transmissão, eficiência espectral, interferência entre células e também o *Carrier Aggregation* (CA) [4]. Foi através do CA que tornou-se possível atingir as taxas de transmissão exigidas pelo IMT-Advanced para ser uma tecnologia de 4G. O CA permite que um equipamento do usuário utilize até 5 canais LTE simultaneamente. Cada um destes canais usados no CA é chamado de *Component Carrier* (CC) e pode ter no máximo uma largura de banda de 20 MHz, assim como no LTE. Assim é possível que um *User Equipment* (UE) tenha uma largura banda total de 100 MHz.

Segundo estatísticas da Cisco [1], em 2015 aplicações do tipo vídeo representaram 55% do total de dados transmitidos em redes móveis, e a previsão é que essa fração aumente para 75% até 2020.

Aplicações do tipo *streaming* de vídeo geram tráfego a uma taxa relativamente constante. À medida que esses dados chegam na rede para serem entregues a um UE, eles são encaminhados à *Evolved Node B* (eNB) [9] e entram na fila do *buffer* para que ela possa transmitir assim que possível. Na maioria das vezes existe um limite máximo de tempo que cada pacote pode aguardar no *buffer* pela transmissão, a partir do qual ele não tem mais utilidade para o UE e deve, então, ser descartado. Este atraso máximo faz parte dos requisitos de qualidade de serviço (*Quality of Service* - QoS) que o UE informa para a rede quando da criação de uma nova *bearer*.

Em [3] foi apresentada uma versão modificada do conhecido simulador LTE-Sim para permitir testes com o CA do LTE-Advanced. Além de disponibilizar o código fonte do simulador foi também apresentado um escalonador chamado *Enhanced Multi-Band Scheduling* (EMBS) que faz uso dessa nova funcionalidade e tem bom desempenho. Nos resultados apresentados, optou-se por considerar somente tráfego do tipo vídeo para todos os usuários, já que este tipo de tráfego é o que ocupa a maior parte da banda nas redes móveis celulares modernas.

Apesar do tráfego de vídeo ser o principal, ele não é o único e, nos estudos de desempenho de uma rede móvel celular, a modelagem deve levar em conta a maioria dos tráfegos significativos. Na avaliação de desempenho apresentada neste artigo, o escalonador EMBS não apresentou bons resultados em justiça, quando alguns dos usuários ocupavam a rede com tráfego do tipo “*buffer* infinito”. Assim, este trabalho propõe uma versão modificada do escalonador EMBS, capaz de apresentar



XIII CEEL - ISSN 2178-8308  
12 a 16 de Outubro de 2015

Universidade Federal de Uberlândia - UFU  
Uberlândia - Minas Gerais - Brasil

melhor desempenho em termos de justiça na presença de tráfego misto na rede.

O restante do artigo está organizado da seguinte maneira. A Seção 2 apresenta uma breve explanação sobre as características do LTE-Advanced e do *Carrier Aggregation* que influenciam o escalonador. A Seção 3 mostra o que foi modificado no escalonador de referência e o que cada modificação impactou nos resultados. A Seção 4 apresenta o simulador utilizado e os parâmetros escolhidos para os cenários de testes. Por último as Seções 5 e 6 mostram os resultados e conclusões do trabalho, respectivamente.

## II. LTE-ADVANCED

O LTE-Advanced, assim como o LTE, suporta tanto *Time Division Duplex* (TDD) quanto *Frequency Division Duplex* (FDD). Na divisão por frequência (FDD), uma faixa da banda de rádio fica reservada para o canal *downlink* e outra faixa reservada para o *uplink*. Na divisão por tempo (TDD) a mesma faixa é compartilhada pelos dois sentidos, mas em intervalos de tempo alternados.

Cada canal de rádio LTE pode ter largura de banda entre 1,4 MHz e 20 MHz. Estes canais são ainda subdivididos em subportadoras igualmente espaçadas de 15 kHz entre si. No tempo, as transmissões são realizadas em *frames* com duração de 10 ms. Estes *frames* são formados por 10 *subframes* de 1 ms cada, que por sua vez são formados por dois *slots* de 0,5 ms. Cada *slot* contém 7 símbolos OFDM, no caso de prefixo cíclico normal, ou 6 símbolos OFDM, no caso de prefixo cíclico longo [9].

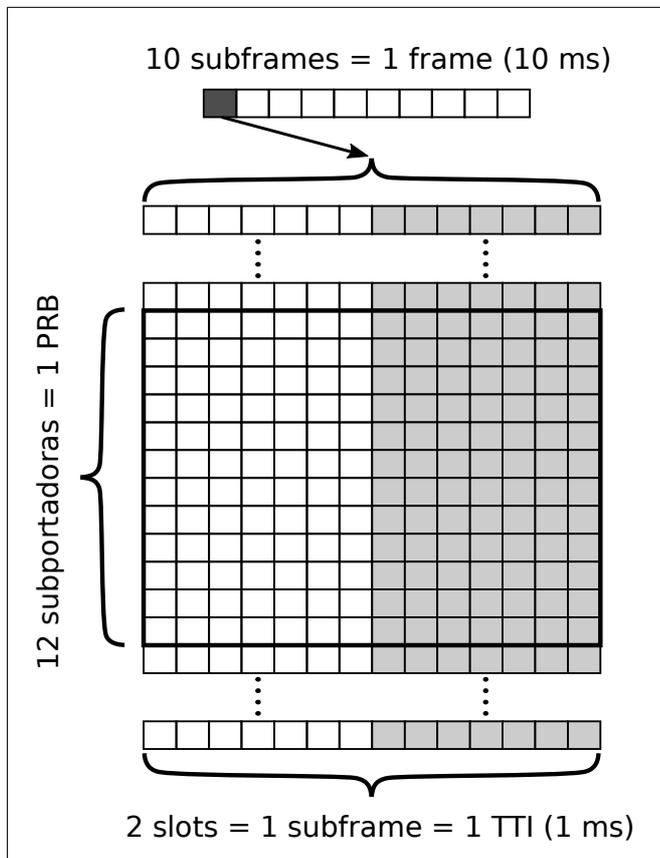


Fig. 1. Grade de recursos.

Ao conjunto de 12 subportadoras no domínio da frequência durante o tempo de 0,5 ms dá-se o nome de *Physical Resource Block* (PRB). O algoritmo de escalonamento deve, a cada 1 ms, decidir como será realizada a divisão dos PRBs disponíveis entre os usuários conectados à célula. Este intervalo é chamado de *Transmission Time Interval* (TTI). Isso significa que os PRBs são sempre alocados em pares. Portanto nesse trabalho os termos RB e PRB são usados para se referir ao par de PRBs. Esta é a menor unidade de recursos de rádio que a rede pode fornecer a um usuário, tanto no *downlink* quanto no *uplink*.

O *Carrier Aggregation* permite agregar até 5 faixas do LTE funcionando como uma única faixa com a largura igual à soma das larguras de cada componente. As faixas agregadas podem ter larguras diferentes umas das outras, de 1,4MHz até 20MHz e não necessariamente estão na mesma banda de frequência, como mostrado na Figura 2. Como os canais não estão necessariamente na mesma banda de frequência, o alcance do sinal pode ser diferente para cada um deles.

Considerando por exemplo um canal *downlink* de 5 MHz, a rede tem, a cada TTI, que decidir como serão distribuídos os 25 PRBs entre os usuários que possuem dados na fila para serem transmitidos. Considerando uma *Carrier Aggregation* com dois canais de 5 MHz cada, a rede teria 50 PRBs para distribuir a cada TTI.

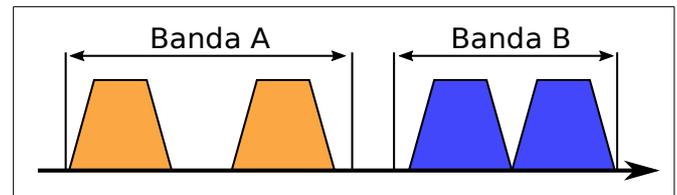


Fig. 2. Carrier Aggregation.

No caso do *uplink*, o padrão escolhido foi o SC-FDMA e então todos os PRBs alocados para um mesmo usuário devem ser contíguos. O LTE-Advanced introduziu o conceito de *clustered* SC-FDMA permitindo que os PRBs sejam alocados em dois grupos não contíguos entre si dentro de cada canal [6] [7]. No caso do *downlink* não existe essa restrição, os PRBs alocados para um usuário podem estar distribuídos pelo canal.

Para poder transmitir dados em uma rede LTE, os usuários precisam antes criar um canal de comunicação na rede. Estes canais são chamados de *bearers* e são usados para indicar os requisitos de qualidade de serviço que cada usuário precisa. Para todo usuário que se conecta na rede é sempre criada uma *bearer* padrão com requisitos de qualidade de serviço mínimos. Se o usuário precisar fazer uma chamada de voz ou assistir a um *streaming* de vídeo, por exemplo, ele pode requisitar da rede a criação de uma nova *bearer* com requisitos de qualidade de serviço mais adequados a esse tipo de tráfego. Isso permite que a rede consiga identificar os diferentes tipos de tráfego e também que a operadora possa ter uma tarifação específica para o uso que o usuário faz da rede. Cada usuário pode ter mais de uma *bearer* ativa ao mesmo tempo, cada uma com diferentes requisitos de QoS.

### A. Índice de Justiça

Para poder comparar o desempenho dos escalonadores, usam-se alguns indicadores que representam o funcionamento da rede durante seu uso. Um dos indicadores usados é o índice de justiça. Este indicador é utilizado para verificar se os usuários ou as aplicações estão obtendo um compartilhamento justo de recursos.

O índice de justiça de um escalonador pode ser calculado entre os usuários de uma mesma classe de dados ou entre usuários de diferentes classes.

Para usuários de uma mesma classe de dados, ou seja, de um mesmo tipo de aplicação, podemos usar o conhecido *Jain's Fairness Index* [13], calculado de acordo com a equação seguinte:

$$\frac{\left(\sum_{i=1}^n x_i\right)^2}{n \cdot \sum_{i=1}^n x_i^2} \quad (1)$$

Onde:

- $x_i$  - Vazão média do usuário  $i$ .
- $n$  - Número de usuários ativos na célula.

Para usuários de aplicações diferentes não podemos usar a mesma fórmula pois as aplicações têm necessidades diferentes em termos de vazão. Usuários com *streaming* de vídeo têm em geral uma vazão maior do que usuários com *Voice over IP* (VoIP). Não se pode considerar o escalonador injusto somente porque um usuário de vídeo teve uma vazão maior do que um de VoIP. Se o escalonador conseguir fornecer recursos suficientes para que todos usuários consigam a taxa de transmissão necessária para suas aplicações ele deve ter um bom índice de justiça.

O cálculo fica ainda mais incoerente quando se considera usuários com aplicações que geram tráfego sem uma taxa média definida como é o caso do "buffer infinito". A vazão destes usuários varia de acordo com a banda disponível, não é possível definir a taxa média de transmissão que a aplicação necessita. Neste caso é necessário comparar a vazão deste usuário com a média dos outros usuários da célula. De acordo com [2], o índice de justiça para *bearers* que necessitem de uma taxa de bits garantida (*Guaranteed Bit Rate* - GBR) ou uma taxa máxima de perda de pacotes (*Packet Loss Ratio* - PLR) é o quanto destes requisitos os usuários atingem. Para usuários sem necessidade de taxa de bits garantida o índice representa o quanto igualmente eles dividem os recursos restantes.

No caso da justiça inter-classe o índice foi calculado fazendo-se uma média ponderada entre os índices de justiça de cada classe.

### III. ALGORITMO PROPOSTO

Tomando como base o escalonador EMBS apresentado em [3] para redes LTE-Advanced, foram feitas modificações para que ele tenha um bom desempenho também em redes com tráfego misto.

Para tomar as decisões de escalonamento, o EMBS calcula uma métrica para cada UE em cada RB que representa a

prioridade que o usuário tem naquele RB. Quanto maior a métrica de um UE em um RB, maior é a prioridade que ele vai ter de recebê-lo. A Figura 3 mostra um pseudo-código do algoritmo EMBS modificado.

```

 $U_{UE}$  = conjunto de UEs na fila
 $R_{RB}$  = conjunto de RBs disponíveis
for all  $u \in U_{UE}$  do
  for all  $r \in R_{RB}$  do
     $metrica[u,r]$  = cálculo da métrica
    Forma-se a matriz de métricas UE/RB
  end for
end for
while  $U_{UE} \neq \emptyset$  e  $R_{RB} \neq \emptyset$  do
   $r$  = primeiro RB disponível
   $u$  = UE  $\in U_{UE}$  com a melhor métrica em  $r$ 
  while  $u$  precisa de RBs e  $R_{RB} \neq \emptyset$  do
    Aloca RB  $r$  para o usuário  $u$ 
     $R_{RB} \leftarrow R_{RB} \setminus \{r\}$ 
     $r$  = próximo RB disponível
  end while
  Após a alocação o usuário é removido do vetor
   $U_{UE} \leftarrow U_{UE} \setminus \{u\}$ 
end while

```

Fig. 3. Algoritmo EMBS modificado.

As aplicações do tipo vídeo e VoIP geram pacotes a uma taxa relativamente constante e os pacotes têm um limite máximo de atraso tolerável. O tráfego do tipo *web* exige um atraso máximo de resposta, mas os pacotes na fila do *buffer* não têm um prazo limite para serem transferidos por completo. Se um arquivo muito grande for adicionado no *buffer* fatalmente os últimos pacotes terão um atraso superior ao máximo definido pelo *QoS Class Index* (QCI).

Por isso a métrica dos pacotes do tipo *web* e "buffer infinito" não é calculada de acordo com o atraso na fila do *buffer*, mas sim pelo tempo de resposta, além dos parâmetros relacionados à taxa de vazão.

O problema encontrado com o uso do escalonador EMBS foi devido à métrica dos usuários com "buffer infinito" ser em geral muito maior do que a métrica dos usuários de vídeo, por exemplo. Com isso os usuários com "buffer infinito" tinham taxas de transmissão altas em detrimento dos usuários com tráfego GBR que acabavam perdendo muitos pacotes devido ao atraso excessivo. O tráfego do tipo "buffer infinito" não tem requisitos rígidos de taxa de transmissão nem de atraso, portanto a rede deveria priorizar os usuários com *bearers* do tipo GBR.

No EMBS, o cálculo da métrica para aplicações "buffer infinito" é diferente do cálculo feito para as outras aplicações. Para as outras aplicações, o cálculo pode ser dividido em duas partes, uma relacionada à taxa de transmissão e outra relacionada ao atraso. Ela privilegia usuários com baixa vazão média, com boa qualidade do canal e com alto atraso.

A proposta então foi calcular a métrica das *bearers* não-GBR usando, principalmente, a parte relacionada à taxa de transmissão do usuário, deixando a parte relacionada ao atraso como uma forma de aumentar a métrica das *bearers* GBR. Para evitar que as *bearers* que não necessitam de GBR

sofram de "inanição" quando os atrasos das *bearers* GBR são muito altos, o tempo desde a última transmissão foi usado no lugar do atraso na fórmula para as *bearers* não-GBR. Assim o cálculo foi o mesmo para os dois tipos.

$$métrica = \frac{Q^2 \cdot A}{T \cdot R} \quad (2)$$

Onde:

- Q - Taxa atingível com a qualidade atual do canal.
- A - Atraso do primeiro pacote (GBR).
- T - Taxa média de transmissão do usuário.
- R - Atraso máximo tolerado de acordo com QoS.

#### IV. AMBIENTE DE SIMULAÇÃO

O simulador usado para avaliar o desempenho do escalonador proposto foi o LTE-Sim, desenvolvido pelo pesquisador Giuseppe Piro [5]. Este simulador foi escolhido por ser *Open Source*, por ter boa aceitação na comunidade científica e por já existir uma implementação de *Carrier Aggregation* desenvolvida por [3]. O simulador foi escrito em linguagem C++ e o código está bem estruturado, o que facilita a compreensão do seu funcionamento.

Nas simulações, o canal foi considerado perfeito, o que quer dizer que todo pacote enviado pela rede sempre chega ao usuário. A única forma de perda de pacotes é quando o atraso ultrapassa o limite máximo e a rede o descarta, ou seja, o pacote nem chega a ser transmitido.

O tempo limite para descartar o pacote foi diferente para cada tipo de *bearer*, e os valores foram baseados nas classes de CQI definidas pelo 3GPP [8]. Para o vídeo, o tempo limite foi definido em 100 ms para permitir a comparação com os resultados do escalonador de referência [3].

O LTE-Sim possui cinco tipos de aplicações para serem usadas nas simulações: VoIP, vídeo, *web*, *Constant Bit Rate* (CBR) e *Best Effort* (BE). A aplicação BE usada no simulador é do tipo "buffer infinito". Nas simulações foram considerados que 10% dos usuários tinham tráfego do tipo VoIP, 10% eram do tipo "buffer infinito", 25% eram *web* e 55% eram vídeo.

Tabela I - Parâmetros de simulação

Parâmetro	Valor
Atraso máximo:	Vídeo: 100 ms VoIP: 100 ms Web: 300 ms "Buffer Infinito": 300 ms
Taxa de vídeo:	128 kbps
Tipo de <i>frame</i> :	FDD
Raio da célula:	1 km
Velocidade dos UEs:	3 km/h
Tempo de simulação:	40 s
Rodadas de simulação:	24
Largura de banda:	2 x 5 MHz (em 800 MHz e 2,6 GHz)

#### V. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Nos gráficos a seguir, "EMBS" representa o escalonador EMBS original e "Proposto" refere-se ao escalonador EMBS

modificado, em que o cálculo da métrica das *bearers* não-GBR foi alterado. Os valores no eixo X indicam a quantidade total de usuários. No ponto 181 por exemplo, existem 100 usuários do tipo vídeo, 45 *web*, 18 VoIP e 18 do tipo "buffer infinito".

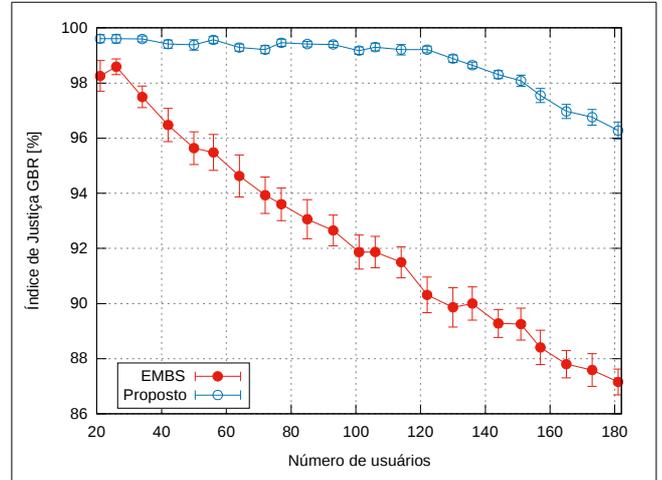


Fig. 4. Índice de justiça para os usuários com aplicação GBR.

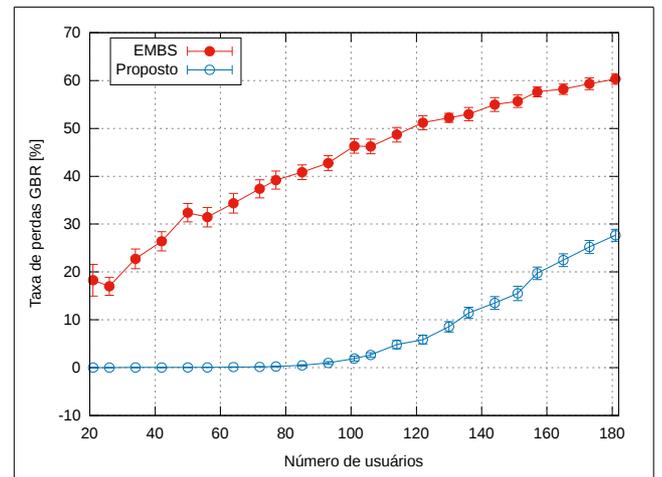


Fig. 5. Taxa de perdas das aplicações GBR.

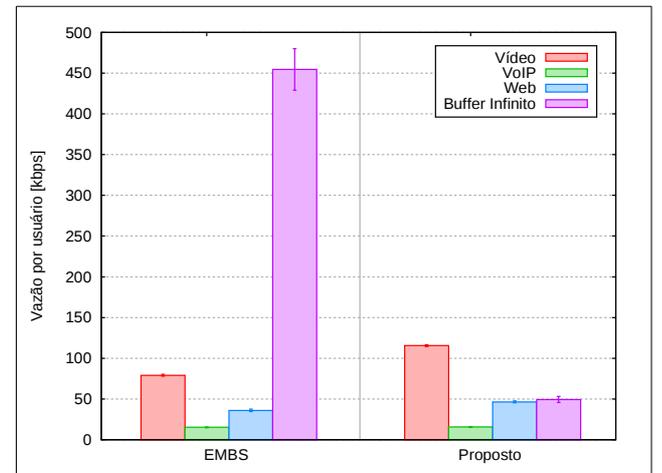


Fig. 6. Vazão média por usuário.

A Figura 4 mostra o índice de justiça para os usuários com *bearers* GBR, ou seja, vídeo e VoIP. O EMBS obteve pior

resultado pois privilegiou os usuários com "buffer infinito" sobrando poucos recursos para os usuários com *bearers* GBR. Já o algoritmo proposto reservou mais recursos para os usuários com maior necessidade de QoS melhorando a justiça e diminuindo a perda de pacotes como pode ser visto na Figura 5.

Vale ressaltar que apesar de o escalonador proposto privilegiar as *bearers* GBR, quando a rede estava congestionada os usuários não-GBR ainda tiveram níveis de vazão próximos aos dos usuários do tipo vídeo, não sofrendo de "inanição". A Figura 6 mostra a vazão média por usuário de cada aplicação em um cenário com 181 usuários. Fica claro que o EMBS privilegia as *bearers* com "buffer infinito" mesmo quando a taxa de perdas das *bearers* GBR é alta. Mesmo com poucos usuários o EMBS não conseguiu manter os níveis de perdas abaixo de 1% como definido em [11].

## VI. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi proposto um algoritmo de escalonamento baseado no algoritmo EMBS com melhores resultados em redes com tráfego misto.

O EMBS foi desenvolvido tendo em vista usuários com tráfego do tipo vídeo e obteve excelentes resultados nesse cenário. A escolha do vídeo deu-se pelo fato de que nas redes modernas este representa a maior parte do tráfego. No entanto em redes reais existe uma grande variedade de aplicações, e quando foram introduzidos outros tipos de tráfego na simulação, especialmente do tipo "buffer infinito", o EMBS teve uma piora considerável na qualidade de serviço dos usuários com aplicações GBR.

Com uma pequena modificação no cálculo da métrica foi possível adaptar o escalonador EMBS para situações com tráfego misto. Pela análise dos resultados obtidos por meio de modelagem e simulação fica claro que o algoritmo proposto prioriza *bearers* com requisitos de atraso, mas ainda assim reserva uma parte dos recursos para os usuários com poucos requisitos de qualidade de serviço.

Desta forma pode-se aplicar o algoritmo EMBS em redes com tráfego misto aproveitando suas vantagens com relação ao uso de múltiplas *Component Carriers* e ainda oferecendo o nível de qualidade de serviço necessário a muito mais usuários. Com a modificação no cálculo da métrica conseguiu-se manter o nível de perdas das aplicações GBR abaixo de 1% em um cenário com 93 usuários, onde 52 deles usavam aplicação de vídeo. O nível de perdas do EMBS original ficou acima dos 10% mesmo em um cenário com apenas 21 usuários, onde 12 eram do tipo vídeo.

## REFERÊNCIAS

- [1] Cisco, "Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2015-2020", white paper, Feb. 2016.
- [2] C. L. Chen, J. W. Lee, C. Y. Wu, and Y. H. Kuo, "Fairness and QoS guarantees of WiMAX OFDMA scheduling with fuzzy controls", *Eurasip Journal on Wireless Communications and Networking*, 2009.
- [3] D. Robalo, F. J. Velez, R. R. Paulo, and G. Piro, "Extending the LTE-Sim Simulator with Multi-Band Scheduling Algorithms for Carrier Aggregation in LTE-Advanced Scenarios", 2015 IEEE 81st Vehicular Technology Conference (VTC Spring), Glasgow, pp. 1-6, 2015.
- [4] R. Zhang, M. Wang, Z. Zheng, X. S. Shen, and L. L. Xie, "Cross-layer carrier selection and power control for LTE-A uplink with Carrier Aggregation", 2013 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM), Atlanta, GA, pp. 4668-4673, 2013.
- [5] G. Piro, L. A. Grieco, G. Boggia, F. Capozzi, and P. Camarda, "Simulating LTE Cellular Systems: An Open-Source Framework", in *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 60, no. 2, pp. 498-513, Feb. 2011.
- [6] N. Abu-Ali, A. E. M. Taha, M. Salah, and H. Hassanein, "Uplink Scheduling in LTE and LTE-Advanced: Tutorial, Survey and Evaluation Framework", in *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 16, no. 3, pp. 1239-1265, Third Quarter 2014.
- [7] Y. Dong, "LTE-Advanced: Radio Access Network Resource Management", Master Thesis, University of Bremen, 2013.
- [8] 3GPP, "Policy and charging control architecture (Release 10)", 3rd Generation Partnership Project (3GPP), TS 23.203, Dec. 2014.
- [9] C. Cox, *An Introduction to LTE: LTE, LTE-Advanced, SAE and 4G Mobile Communications*, John Wiley & Sons, 2012.
- [10] D. Robalo, "Planning and Dynamic Spectrum Management in Heterogeneous Mobile Networks with QoE Optimization", Doctoral Thesis, Universidade da Beira Interior, 2014.
- [11] 3GPP, "Services and service capabilities (Release 12)", 3rd Generation Partnership Project (3GPP), TS 22.105, Dec. 2014.
- [12] 3GPP, "Overview of 3GPP Release 10", 3rd Generation Partnership Project (3GPP), Jun. 2014. Acedido em 30 de Junho de 2016, em: [www.3gpp.org/ftp/Information/WORK\\_PLAN/Description\\_Releases/](http://www.3gpp.org/ftp/Information/WORK_PLAN/Description_Releases/)
- [13] R. K. Jain, D. W. Chiu, and W. R. Hawe, "A Quantitative Measure of Fairness and Discrimination Systems for Resource Allocation in Shared Computer Systems", *ACM Transaction on Computer Systems*, Sep. 1984.