

Alocação de Blocos de Recurso em Redes LTE com Estimativa de Limitante de Retardo através de Cálculo de Rede

Marcus Vinícius Gonzaga Ferreira, Flávio Henrique Teles Vieira, Marcelo Stehling de Castro, Sérgio Granato de Araújo e Flávio Geraldo Coelho Rocha

Resumo— Neste artigo é proposto um algoritmo de alocação de blocos de recurso para sistemas de comunicação LTE (*Long Term Evolution*) que considera o limitante de retardo estimado através de Cálculo de Rede utilizando curva de serviço e processo envelope MFBAP (*Multifractal Bounded Arrival Process*) para decidir sobre a alocação de recursos de rádio disponíveis. São realizadas comparações com outros algoritmos de alocação através de parâmetros de QoS (*Quality of Service*) como retardo médio, vazão total, tempo de processamento, taxa de perda e índice de justiça (*fairness*), comprovando a eficiência do algoritmo proposto.

Palavras-Chave— LTE, Escalonamento, Retardo, Cálculo de Rede.

Abstract— In this paper it is proposed an algorithm to allocate resource blocks for LTE (*Long Term Evolution*) communication systems which considers the delay target estimated through Network Calculus using service curve and MFBAP (*Multifractal Bounded Arrival Process*) envelope process in order to decide on the scheduling of available radio resources. Comparisons with other allocation algorithms are carried out through QoS (*Quality of Service*) parameters such as average delay, total throughput, processing time, loss rate and fairness index, proving the efficiency of the proposed algorithm.

Keywords— LTE, Scheduling, Delay, Network Calculus.

I. INTRODUÇÃO

O aumento do uso da telefonia móvel para o acesso à Internet tem levado a uma crescente demanda por tráfego de dados, tornando necessário a evolução contínua da tecnologia móvel celular. Neste contexto, aparece o sistema LTE (*Long Term Evolution*) como evolução da tecnologia 3G, que tem como objetivo fornecer altas taxas de dados, baixa latência, acesso via rádio otimizado por pacote e flexibilidade de implementação de larguras de banda [1]. O LTE utiliza a tecnologia OFDM (*Orthogonal Frequency-Division Multiplexing*) na transmissão de *downlink*, o que permite maior liberdade no escalonamento de canal.

A alocação de recursos de rádio para o sistema LTE tem sido extensamente estudada, como exemplo se tem o algoritmo PSO (*Particle Swarm Optimization*) [2], o algoritmo QoS (*Quality of Service*) garantido [3] e o algoritmo de minimização de retardo real [4]. Os algoritmos de alocação de

recursos de rádio LTE são limitados pela restrição da utilização do MCS (*Modulation Coding Scheme*), ou seja, todos os blocos de escalonamento (SB - *Scheduling Blocks*), unidade básica de alocação, alocados para certo usuário devem usar o mesmo MCS em qualquer intervalo de tempo de transmissão (TTI - *Transmission Time Interval*) com configuração de antena única [2].

Neste artigo, propõe-se um algoritmo que tem como objetivo minimizar o retardo do sistema, parâmetro de QoS essencial para aplicações em tempo real com taxa de transmissão variável e requisitos específicos de banda, como serviços de VoIP (*Voice over Internet Protocol*) e de videoconferência. O limitante de retardo é estimado através do Cálculo de Rede Determinístico a fim de prover QoS em redes de comunicação, diferentemente de outros trabalhos da literatura que utilizam valores reais passados [4] [5] de retardo da rede. Assim, na nossa proposta, podemos atualizar a estimativa de retardo a medida que as características dos dados de tráfego no sistema variam. Na estimativa proposta de retardo são utilizados conceitos de curva de serviço e processo envelope MFBAP (*Multifractal Bounded Arrival Process*) [6].

O artigo está organizado da seguinte forma: na Seção II são apresentados os conceitos de Cálculo de Rede, processo envelope MFBAP, curva de serviço e estimativa de limitante de retardo; na Seção III é apresentado o modelo de transmissão *downlink* LTE; na Seção IV é proposto o algoritmo de alocação de blocos de recurso em redes LTE; na Seção V são apresentados os parâmetros de simulação e os resultados; na Seção VI é concluído o artigo com as considerações finais.

II. CÁLCULO DE REDE DETERMINÍSTICO

O Cálculo de Rede Determinístico pode ser utilizado para estimar recursos a fim de prover QoS em redes e tem fornecido ferramentas poderosas para estimação do *backlog* e retardo em uma rede com garantia de serviço para fluxos de tráfego individuais. Usando a noção de processo envelope, curvas de chegada e curvas de serviço, vários trabalhos tem demonstrado que os limitantes de *backlog* e retardo podem ser concisamente expressos pela álgebra Min-Plus [7].

A. Processo envelope MFBAP (*Multifractal Bounded Arrival Process*)

O processo envelope para o tráfego de chegada de pacotes é um limitante superior para o processo real de tráfego de pacotes acumulados. Para um processo envelope determinístico,

Marcus Vinícius Gonzaga Ferreira, Flávio Henrique Teles Vieira, Marcelo Stehling de Castro, Sérgio Granato de Araújo e Flávio Geraldo Coelho Rocha, Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação / Instituto de Informática - Universidade Federal de Goiás - Goiânia - Goiás - Brasil, E-mails: mvfgerreira@tjgo.jus.br, flavio@eee.ufg.br, mcastro@eeec.ufg.br, granato@emc.ufg.br, flavio@inf.ufg.br.

a função limitante $\hat{A}(t)$ corresponde ao valor máximo de um fluxo $A(t)$ no intervalo de tempo $[s, s + t]$, e é definida pela equação [7]:

$$\hat{A}(t) = \sup_{s \geq 0} A[s, s + t] \quad (1)$$

O MFBAP é uma alternativa determinística de se obter o processo envelope que limita o volume do tráfego em um dado intervalo de tempo [8], calculado da seguinte forma [6]:

$$\hat{A}_{MFBAP}(t) = \bar{a}t + k\sigma t^{H(t)} + B \quad (2)$$

onde $H(t)$ é o expoente de Hölder, t é o instante de tempo, \bar{a} e σ são respectivamente, a média e o desvio padrão do tráfego de entrada, k é a constante relacionada à probabilidade de violação (para $\epsilon = 10^{-6}$) do processo envelope e B é o tamanho do *buffer*.

B. Estimativa de limitante de retardo

O limitante superior para o retardo, denotado por \hat{d} , é dado por [6]:

$$\hat{d} = \inf \{d \geq 0 | \forall t \geq 0 : A^*(t - d) \leq S(t)\} \quad (3)$$

Assim, propõe-se neste artigo utilizar essa equação para estimar o limitante de retardo, onde A^* é o processo envelope MFBAP, calculado conforme Equação (2), e S é a curva de serviço, generalizada para qualquer usuário de um sistema OFDM servido pelo mesmo intervalo de tempo T por [9]:

$$S_n(t) = rTP + rT \min \left\{ \frac{\max [t - PNT - (n - 1)T; 0]}{T}; 1 \right\} \quad (4)$$

onde r é a média da taxa de atendimento no servidor do sistema e N é o número de intervalos de tempo T por ciclo completo P , sendo $P = \lfloor \frac{t}{NT} \rfloor$.

III. MODELO DE TRANSMISSÃO DOWNLINK LTE

A. Estrutura do frame LTE

A estrutura de um *frame* de transmissão *downlink* LTE é mostrado na Figura 1. Cada *frame* de rádio ocupa 10ms, que são divididos em dez *subframes* de 1ms [10]. Cada *subframe* por sua vez é dividido em dois *slots* de tempo de 0.5ms. Há sete ou seis símbolos OFDM para cada *slot* de tempo, dependendo da utilização de, respectivamente, prefixo ciclo normal ou estendido [10].

No domínio da frequência os recursos são agrupados em 12 subportadoras de 15KHz, totalizando um largura de banda de 180KHz. Um bloco de recurso (RB - *Resource Block*) é definido como uma unidade de 12 subportadoras durante um *slot* de tempo [11]. No sistema LTE os blocos de recursos são escalonados sempre em pares de RBs, chamados assim de blocos de escalonamento (SB).

B. Modelo do sistema

Considerando um cenário de transmissão *downlink* de um sistema LTE de uma antena, com N blocos de recursos disponíveis por TTI (*Transmission Time Interval*), quantidade de potência distribuída igualmente entre todas as subportadoras

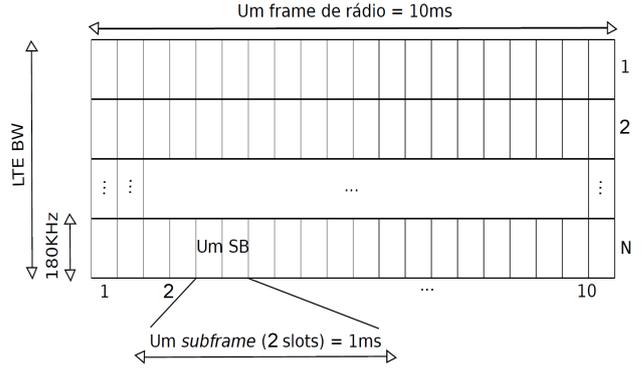


Fig. 1. Estrutura básica de um *frame* LTE no domínio do tempo e frequência

e K usuários servidos a taxas mínimas R_k iguais as capacidades indicadas pelas bandas efetivas ou capacidades mínimas definidas R'_k . Seja BE_k a banda efetiva para o usuário k calculada adaptativamente através da proposta apresentada em [12] e R'_k a taxa mínima definida para o usuário, define-se a taxa mínima para o usuário k :

$$R_k = \max(BE_k, R'_k), \quad (5)$$

O modelo de tráfego β MWM Adaptativo [12] é utilizado para estimação de banda efetiva nesse esquema de alocação devido a sua capacidade de cálculo de banda efetiva em tempo real. Uma vez atendido o valor da capacidade indicada pela banda efetiva, os requisitos de QoS exigidos para o tráfego deverão ser atendidos.

Maximizar a taxa de bits total do sistema T_b é uma forma de melhorar a utilização da rede. Porém, juntamente com o aumento da taxa de bits total do sistema é necessário atender certos requisitos de banda de cada usuário. Assim, tem-se um problema de otimização que consiste em maximizar a taxa do sistema atendendo a taxa mínima de cada usuário:

$$(x) : \max T_b, \quad (6)$$

sujeito a:

$$r_k \geq R_k \quad \forall k. \quad (7)$$

IV. ALGORITMO DE ALOCAÇÃO DE BLOCOS DE RECURSO PROPOSTO

Em [4], é proposto um algoritmo de escalonamento que procura minimizar o retardo em redes LTE. A principal diferença do algoritmo apresentado em [4] e do algoritmo proposto neste artigo é que neste último o limitante de retardo é estimado a medida que as características dos dados de tráfego no sistema variam, utilizando conceito de Cálculo de Rede, conforme explicado na Seção II. No algoritmo apresentado em [4] o retardo foi calculado com base em valores reais passados de retardo da rede. Sendo assim, a vantagem da proposta do presente artigo é que o algoritmo pode tomar decisões antecipadas utilizando as estimativas e previsões de retardo baseados em uma modelagem do tráfego e do sistema.

O algoritmo proposto pode ser resumido em três fases:

- 1) Estima o número de SBs requeridos para cada usuário com prioridade baseada no ganho médio de canal;

- 2) Aloca os SBs para os usuários de acordo com as prioridades, o limitante de retardo estimado conforme Equação (3), e o critério de retardo máximo definido na Tabela II;
- 3) Aloca os SBs remanescentes para os usuários com prioridade definida de acordo com o retardo estimado.

A prioridade na alocação dos recursos é definida em ordem crescente pelo ganho médio do canal por usuário, ou seja, os usuários com piores condições de canal tem maior prioridade. O ganho médio do canal G_k por usuário k é calculado pela seguinte equação:

$$G_k = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N g_{k,n} \quad (8)$$

onde $g_{k,n}$ é o ganho médio do canal para o usuário k no n -ésimo SB e N é o número de SBs disponíveis para *downlink* LTE.

A quantidade N_k de SBs requeridas para cada usuário k é calculada da seguinte forma, com base nas condições do canal:

$$N_k = \text{round} \left(\left(\frac{G_k}{G_1 + G_2 + \dots + G_k} \right) * N \right) \quad (9)$$

onde G_k é o ganho médio do canal por usuário k , N é o número de SBs disponíveis para *downlink* LTE e $\text{round}(\cdot)$ é uma função de arredondamento para o inteiro mais próximo.

Após o cálculo da prioridade de alocação, os SBs com maior indicador de qualidade de canal (CQI - *Channel Quality Indicator*) são alocados de acordo com a quantidade de SBs estimadas para cada usuário. Depois é estimado o limitante de retardo conforme Equação (3) e verificado se o critério de retardo, definido conforme Tabela II, é satisfeito. Se o critério não é satisfeito o algoritmo continua alocando SBs com maior CQI até satisfazer o critério.

O algoritmo garante a alocação dos SBs de forma justa, uma vez que prioriza os usuários com piores condições do canal com objetivo de satisfazer o critério de retardo, ao mesmo tempo que aloca uma quantidade maior de SBs para os usuários com melhores condições de canal.

Após verificado se o critério de retardo máximo foi satisfeito para todos os usuários, o algoritmo aloca os SBs remanescentes, se houver, priorizando o valor de retardo estimado de cada usuário, isto é, os usuários com maiores valores de retardo estimado tem maior prioridade. O objetivo é minimizar o retardo médio depois de satisfeito o critério.

V. SIMULAÇÕES E RESULTADOS

Nesta seção são apresentados os resultados das simulações do algoritmo de alocação proposto, comparando com o algoritmo PSO (*Particle Swarm Optimization*) [2], o algoritmo QoS garantido [3] e o algoritmo de minimização de retardo real [4]. O algoritmo denominado de PSO neste trabalho consiste na aplicação do algoritmo de enxame de partículas para solução do problema de otimização representado pelas Equações (6) e (7). Já os algoritmos QoS garantido e de minimização de retardo real buscam reduzir a complexidade computacional do problema de otimização representado pelas Equações (6) e (7), levando em conta, respectivamente, a

restrição da taxa mínima requerida e o critério de retardo máximo utilizando a informação de retardo real da rede.

As simulações foram realizadas por meio do software MATLAB versão R2014a, utilizando um microcomputador com a seguinte configuração: Processador Intel Core I5-3570 3.40 GHz, 8GB RAM, HD SATA III 7200 RPM, Windows 8 64bits.

A. Modelo de canal e parâmetros do sistema LTE

As condições do canal para cada usuário e SB em termos de SINR (*Signal-to-Interference-plus-Noise-Ratio*) foram gerados para 1000 TTIs através da seguinte equação [13]:

$$\text{SINR} = \frac{G_o P_o}{\sum_{j=1}^J G_j P_j + \sigma_n^2} \quad (10)$$

onde G_o é o ganho do canal para a potência de transmissão P_o , G_j é o ganho do canal para os sinais de interferência com potência P_j , σ_n^2 é a potência do ruído e J é o número de células de interferência.

Os valores das taxas de transmissão e SINRs associados ao esquema MCS foram escolhidos conforme [14]. A Tabela I mostra os parâmetros de transmissão *downlink* no sistema LTE e o modelo de canal considerado.

TABELA I
PARÂMETROS DE SIMULAÇÃO PARA MODELAGEM DE CANAL E SISTEMA LTE

Nº de blocos de recursos	25
Largura de banda	5MHz
Nº de TTIs simulados	1000
Tamanho de <i>buffer</i> por usuário	60kB [6]
Taxa de perda na estimativa de banda efetiva	1% [12]
Modelo multipercurso	Rayleigh [13]
Perfil de atraso multipercurso	Pedestre Estendido A (EPA), Veicular Estendido A (EVA), Urbano Típico Estendido (ETU) [11]
Modelo de perda de percurso	$L = 128.1 * 37.6 \log_{10}(R)$, R em km [15]
Distância entre UE (<i>User Equipment</i>) e BS (<i>Base Station</i>)	1km [15]
Densidade de potência do ruído branco	-174dBm/Hz [15]
Potência máxima do transmissor BS	46dBm [15]
Ganho da antena BS após perda no cabo	15dBi [15]
Ganho da antena UE	0dBi [15]
Figura de ruído UE	9dB [15]
Margem de interferência UE	4dB [15]
Velocidade UE	3km/h [13]

Foram consideradas cinco séries reais de tráfego TCP/IP (*Transmission Control Protocol/Internet Protocol*) para representação dos usuários em 1000 TTIs durante a simulação, agregadas no domínio do tempo em intervalos de 100ms. As séries de tráfego consideradas representam o tráfego TCP/IP entre a Universidade de Waikato com redes externas,

coletados entre 20/05/2011 e 29/10/2011 (disponíveis no endereço eletrônico <http://wand.net.nz/wits/waikato/8/>).

B. Resultados

Considerando os parâmetros de transmissão *downlink* no sistema LTE e do modelo de canal dados na Tabela I, avalia-se nesta seção o desempenho do algoritmo de escalonamento proposto em comparação com outros da literatura. Os valores dos parâmetros de QoS apresentados representam valores médios considerando 1000 TTIs.

A Tabela III mostra a taxa de atendimento ao critério de retardo máximo, definido conforme Tabela II, considerando de 2 a 20 usuários em 1000 TTIs simulados. Nota-se que o algoritmo proposto garante 99.68% de atendimento ao critério. Os valores de critério de retardo foram definidos com base em valores observados em simulação.

TABELA II
VALORES DE CRITÉRIO DE RETARDO MÁXIMO ADOADOS

Número de usuários	Retardo (ms)
2, 3 ou 4	180
5, 6, 7 ou 8	360
9, 10, 11 ou 12	540
13, 14, 15, 16, 17, 18, 19 ou 20	720

TABELA III
TAXA DE ATENDIMENTO AO CRITÉRIO DE RETARDO MÁXIMO - TOTAL DE 209000 USUÁRIOS

Algoritmo	Nº de usuários que não atingiram critério	Taxa de atendimento (%)
QoS garantido	15453	92.60
PSO	25544	87.77
Retardo real	2128	98.98
Proposto	659	99.68

A Figura 2 mostra que o retardo médio por usuário é significativamente menor para o algoritmo proposto do que os algoritmos QoS garantido e PSO, com valores similares ao algoritmo de retardo real. Os pontos não demarcados no gráfico significam que o retardo médio tende a infinito, isto é, um ou mais usuários apresentam taxa de transmissão igual a zero. O algoritmo proposto garante distribuição dos recursos de rádio para todos os usuários, mesmo aqueles com piores condições de canal.

O algoritmo PSO apresenta em geral a maior vazão total, conforme pode ser visto na Figura 3. Este fato era esperado visto o algoritmo PSO ser uma heurística de maximização da vazão total em detrimento do elevado tempo de processamento. O algoritmo proposto apresenta vazão total similar ao algoritmo QoS garantido e maior do que o algoritmo de retardo real.

Quanto ao tempo de processamento, o algoritmo proposto apresenta valores bastante inferiores aos apresentados pelo algoritmo PSO e superiores aos valores apresentados pelos algoritmos QoS garantido e de retardo real, conforme pode ser visto na Tabela IV.

O índice de justiça é uma importante medida para determinar se os usuários estão recebendo uma distribuição justa

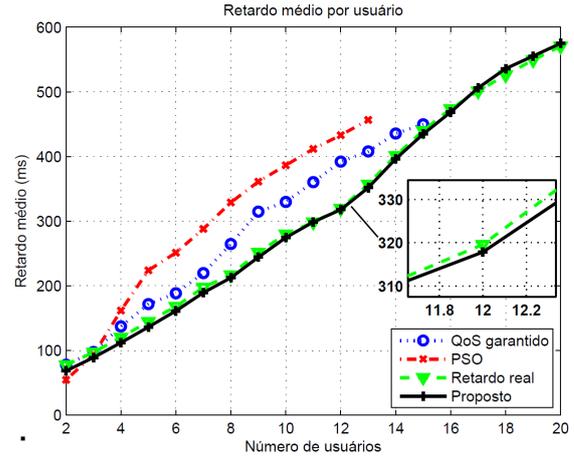


Fig. 2. Retardo médio em função do número de usuários

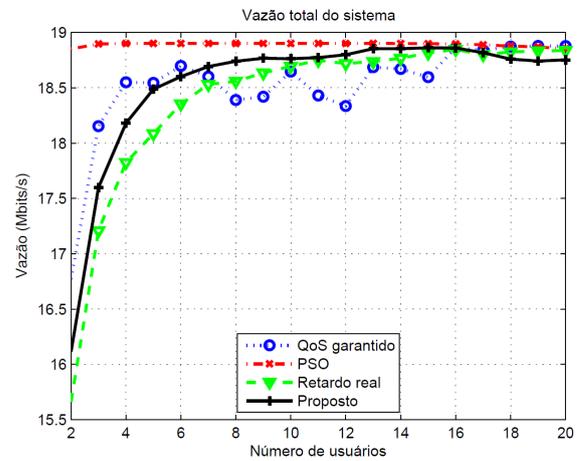


Fig. 3. Vazão total em função do número de usuários

dos recursos do sistema. A Figura 4 mostra que o algoritmo proposto apresenta valores para o índice de justiça maiores do que os apresentados pelo algoritmo PSO. O algoritmo QoS garantido privilegiou a justiça ao invés da taxa de perda e retardo. O *fairness* foi calculado da seguinte forma [16]:

$$Fairness = \frac{\left[\sum_{k=1}^K x_k \right]^2}{K \sum_{k=1}^K x_k^2} \quad (11)$$

onde $x_k = \frac{r_k}{R_k}$ é a taxa normalizada, r_k é a taxa do usuário k , R_k é a taxa mínima requerida do usuário k e K é o número total de usuários.

A Figura 5 mostra que o algoritmo proposto apresenta em geral taxas de perda menores do que os dos demais algoritmos simulados, principalmente para um maior número de usuários.

VI. CONCLUSÃO

Neste artigo propomos um algoritmo que objetiva minimizar o retardo do sistema utilizando a informação de retardo estimado por Cálculo de Rede através de conceitos de curva de serviço e processo envelope MFBAP. Assim, em nossa

TABELA IV

TEMPO DE PROCESSAMENTO MÉDIO (MS) EM FUNÇÃO DO NÚMERO DE USUÁRIOS

Nº de usuários	4	8	12	16	20
QoS garantido	0.263	0.365	0.458	0.565	0.416
PSO	76.418	77.970	78.928	81.019	78.577
Retardo real	0.294	0.499	0.683	0.555	0.474
Proposto	1.315	2.650	3.965	4.256	2.959

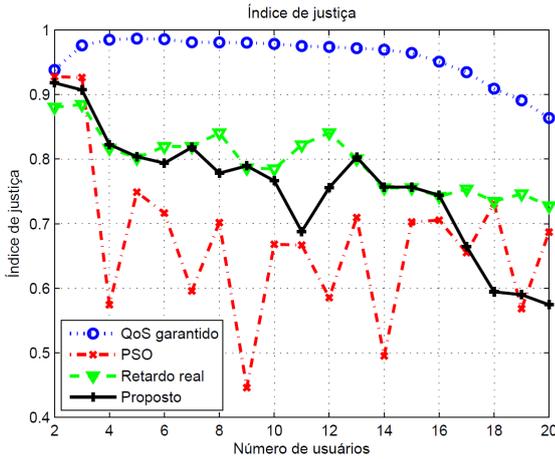


Fig. 4. Índice de justiça (*fairness*) em função do número de usuários

proposta, podemos atualizar a estimativa de retardo a medida que as características dos dados de tráfego no sistema variam a fim de tomar decisões antecipadas sobre a alocação de recursos na transmissão *downlink* LTE.

Os resultados das simulações mostram que o desempenho do algoritmo proposto é em geral superior ou similar ao desempenho dos algoritmos QoS garantido [3], PSO [2] e de minimização de retardo real [4], principalmente em termos de taxa de perda e retardo médio. O escalonamento é garantido para todos os usuários em nossa proposta, ou seja, o retardo médio do sistema não tende ao infinito. O algoritmo proposto apresenta em geral menores valores para taxa de perda e retardo que os demais algoritmos simulados, além de garantir taxa de atendimento ao critério de retardo definido próximo de 100%.

Em termos de vazão total, o algoritmo proposto provê vazão similar ou superior ao algoritmo QoS garantido e superior ao algoritmo de retardo real. Nota-se também que o algoritmo apresenta baixo tempo computacional e valores de *fairness* maiores do que os apresentados pelo algoritmo PSO.

Como pesquisa futura, pretendemos aplicar a informação de retardo estimado no controle de admissão de usuários a fim de garantir o critério de retardo máximo, e testar o desempenho com diferentes séries reais de tráfego.

REFERÊNCIAS

[1] 3GPP TR 25.913 version 8.0.0 Release 8, *Universal Mobile Telecommunications System (UMTS); LTE; Requirement for Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) and Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN)*, 2009.

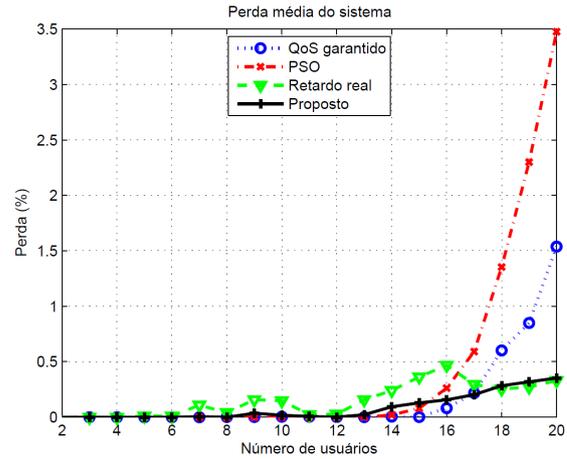


Fig. 5. Taxa de perda em função do número de usuários

[2] Su, Lin; Wang, Ping; Liu, Fuqiang, "Particle swarm optimization based resource block allocation algorithm for downlink LTE systems", *Communications (APCC), 2012 18th Asia-Pacific Conference on*, vol., no., pp.970,974, 15-17 Oct. 2012.

[3] Guan, Na; Zhou, Yiqing; Tian, Lin; Sun, Gang; Shi, Jinglin, "QoS guaranteed resource block allocation algorithm for LTE systems", *WiMob, 2011 IEEE 7th International Conference on*, vol., no., pp.307,312, 10-12 Oct. 2011.

[4] Ferreira, M.V.G.; Vieira, F.H.T; Abrahão, D.C., "Minimizing Delay in Resource Block Allocation Algorithm of LTE Downlink", *VI International Workshop on Telecommunications: IWT 2015*.

[5] Delgado, O.; Jaumard, B., "Scheduling and Resource Allocation in LTE Uplink with a Delay Requirement", *Communication Networks and Services Research Conference (CNSR), 2010 Eighth Annual*, vol., no., pp.268,275, 11-14 May 2010.

[6] Vieira, F.H.T.; Santos, J.A.; Cardoso, A.A., "Estimation of backlog and delay in OFDM/TDMA systems with traffic policing using Network Calculus", *Computers and Electrical Engineering*. Volume 39, Issue 8, pages 25072520, November 2013.

[7] Boudec, J.Y.L.; Thiran, P., *Network Calculus: A Theory of Deterministic Queuing Systems for the Internet*, Springer Verlag, Lecture Notes in Computer Science, LNCS 2050, 2004.

[8] Pereira, F. M., *Policamento e escalonamento de tráfego em redes Ethernet PON*, Campinas - SP, 2006.

[9] Costa, V.H.T., *Análise de desempenho de sistemas de comunicação OFDM-TDMA utilizando cadeias de Markov e curva de serviço*, Goiânia - GO, 2013.

[10] Dahlman E.; Parkvall S.; Beming P., *3G Evolution HSPA and LTE for Mobile Broadband*, Elsevier, Great Britain, Pag. 317 e 321, 2007.

[11] 3GPP TS 36.104 version 8.3.0 Release 8, *LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Base Station (BS) radio transmission and reception*, 2008.

[12] Vieira, F. H. T.; Gonçalves, B. H. P.; Rocha, F. G. C.; Lee, L.L.; Ferreira, M.V.G., "Dynamic Resource Allocation in LTE Systems using an Algorithm based on Particle Swarm Optimization and BetaMWM Network Traffic Modeling". *6th IEEE Latin American Symposium on Circuits and Systems: IEEE LASCAS 2015*.

[13] Ni, Mingjian; Xu, Xiang; Mathar, R., "A Channel Feedback Model with Robust SINR Prediction for LTE Systems", *7th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, 2013.

[14] Huang, Jeng-Ji; Lin, Wei-Keng; Ko, Hung-Hsiang, "A Resource Allocation Algorithm for Maximizing Packet Transmission in Downlink LTE Cellular Systems", *TENCON 2011 - 2011 IEEE Region 10 Conference*, vol., no., pp.445,449, 21-24 Nov. 2011.

[15] 3GPP TR 36.931 version 9.0.0 Release 9, *LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Radio Frequency (RF) requirements for LTE Pico Node B*, 2011.

[16] Jain, Raj; Durrezi, Arjan; Babic, Gojko, *Throughput Fairness Index: An Explanation*, Department of CIS, The Ohio State University, ATM.Forum/99-0045, 1999.