



## **ALGORITMO DE ALOCAÇÃO DE BLOCOS DE RECURSOS COM ATENDIMENTO A CRITÉRIO DE JUSTIÇA PARA REDES SEM FIO LTE**

### **Diego Cruz Abrahão**

Universidade Federal de Goiás  
Av. Universitária, n.º 1488, qd. 86, bloco A, Setor Leste Universitário, Goiânia-Goiás  
diegoabrahao@outlook.com

### **Flávio Henrique Teles Vieira**

Universidade Federal de Goiás  
Av. Universitária, n.º 1488, qd. 86, bloco A, Setor Leste Universitário, Goiânia-Goiás  
flavio@eee.ufg.br

### **Marcus Vinícius Gonzaga Ferreira**

Universidade Federal de Goiás  
Av. Universitária, n.º 1488, qd. 86, bloco A, Setor Leste Universitário, Goiânia-Goiás  
marcusviniciusbr@gmail.com

### **RESUMO**

Neste trabalho, propomos um algoritmo de alocação de blocos de recursos para os sistemas de comunicação LTE (*Long Term Evolution*), tendo em vista o atendimento de parâmetros de Qualidade de Serviço (QoS) dos usuários e das restrições do esquema de modulação e código (MCS - *modulation and coding scheme*) da transmissão de *downlink* LTE. O algoritmo proposto leva em consideração a qualidade do canal e a exigência de taxa mínima de dados de cada usuário, para decidir sobre o escalonamento de recursos de rádio disponíveis. Um dos fatores que diferencia o algoritmo proposto de outros algoritmos da literatura é que este atende ao critério de justiça na tarefa de escalonamento. Comparações com outros algoritmos foram realizadas comprovando a eficiência do algoritmo proposto.

**PALAVRAS CHAVE.** LTE, Escalonamento, QoS.

**PO em Telecomunicações e Sistema de Informação**

### **ABSTRACT**

In this paper, we propose an algorithm to allocate resource blocks for LTE (*Long Term Evolution*) systems where it is taken into account the requirement of Quality of Service (QoS) parameters of users and the modulation and coding scheme (MCS) characteristics of the LTE downlink transmission. The proposed algorithm takes into account the channel quality and the requirement of a minimum data rate for each user in order to decide on the scheduling of available radio resources. One factor that distinguishes the proposed algorithms to other algorithms from the literature is the attainment of a fairness criterion in task scheduling. Comparisons with other algorithms were made proving the efficiency of the proposed algorithm.

**KEYWORDS.** LTE, Scheduling, Quality of Service (QoS).

**PO in Telecommunications and Information System**

## 1. Introdução

Com o aumento do uso da telefonia móvel para o acesso à internet, há uma exigência crescente da demanda por tráfego de dados, o que torna necessário a evolução 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 rádio otimizado por pacote e flexibilidade de implementação de larguras de banda (3GPP, 2008). O LTE emprega a Multiplexação por Divisão de Frequência Ortogonal (OFDM) na transmissão de *downlink*, o que permite maior liberdade no escalonamento de canal. O princípio básico do OFDM é a divisão de uma banda larga em múltiplas bandas estreitas, utilizadas para a transmissão de informações em paralelo. O OFDM permite o gerenciamento flexível dos recursos de rádio (Yang, 2001), um desafio do sistema LTE é suportar um grande número de usuários e satisfazer suas diferentes exigências de taxas, dado um recurso de rádio limitado (Guan, 2011).

A alocação de recursos de rádio para o sistema LTE tem sido extensamente estudada, como exemplo temos a aplicação do algoritmo PSO (*Particle Swarm Optimization*) (Su, 2012) e o algoritmo apresentado em (Guan, 2011). Os algoritmos de alocação de recursos de rádio LTE são limitados pela restrição da utilização do esquema de modulação e código (MCS). O MCS adotado por um usuário, durante um intervalo de tempo de transmissão (TTI - *Transmission Time Interval*), deve ser o mesmo para todos os blocos de recursos alocados a ele, em uma configuração de antena única.

Considerando as restrições de MCS e das exigências de QoS (*Quality of Service*), o algoritmo proposto neste trabalho, primeiramente estima o número de SBs (blocos de escalonamento) para cada usuário, tendo em vista a quantidade de recursos disponíveis e a taxa mínima requerida pelos usuários. Em seguida, os SBs estimados são alocados avaliando-se uma prioridade variável, que é calculada considerando a taxa de dados alcançada para cada usuário e a taxa mínima exigida. Quanto maior a diferença entre a taxa de dados mínima exigida e a taxa de dados alcançada pelo usuário, maior é a sua prioridade. Após os requisitos de QoS de todos os usuários serem atendidos, os SBs restantes são alocados, tendo em vista a média de condição do canal dos usuários, dando maior prioridade para o usuário com melhor condição de canal. Em outras palavras, o algoritmo proposto utiliza o critério Max-min (Winston, 2003), para que haja um escalonamento justo para os usuários com a menor perda possível.

O trabalho está organizando da seguinte forma. Na seção 2 é apresentada a estrutura de um *frame* LTE e o modelo do sistema. Na seção 3, é apresentado o algoritmo PSO. Na seção 4 é proposto um algoritmo para alocação de recursos para o sistema LTE. Na seção 5, validamos o algoritmo proposto, apresentando os resultados de simulações realizadas. Finalmente, concluímos na seção 6.

## 2. Estrutura do Frame LTE e o Modelo do sistema

### A. Estrutura do *frame* LTE

A estrutura de um *frame* de transmissão de *downlink* LTE é mostrada na figura 1. Cada *frame* de rádio ocupa 10ms, que são divididos em dez *subframes* de 1ms (Dahlman, 2007). 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 prefixo ciclo normal ou estendido, respectivamente (Dahlman, 2007).

No domínio da frequência os recursos são agrupados em 12 subportadoras de 15KHz, totalizando uma 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 (3GPP, 2008). No sistema LTE os blocos de recursos são escalonados sempre em pares de RBs, chamados assim de blocos de escalonamento (SB), com duração de 1ms.

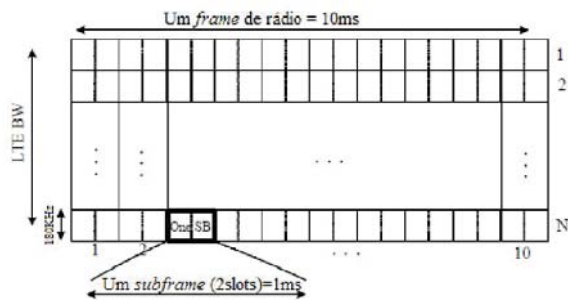


Fig 1. Estrutura de recurso tempo-frequência básico do LTE

## B. Modelo do Sistema

Considerando a transmissão de *downlink* do sistema LTE com  $N$  SBs, onde cada SB é alocado com a mesma potência. Assumindo que  $K$  usuários são servidos por uma estação base (BS - *Base Station*), e que a taxa mínima exigida pelo  $k$ -ésimo usuário seja  $R_k$  Mbits/s. Define-se um bloco de escalonamento (SB) com  $N_s$  símbolos OFDM consecutivos no domínio do tempo e  $N_{sc}$  subportadoras consecutivas no domínio da frequência. Considerando que existem sinais pilotos e de controle nos blocos de escalonamento, apenas  $N_{sc}^{(d)}(s)$  das  $N_{sc}$  subportadoras podem ser utilizadas para transferência de dados no  $s$ -ésimo símbolo OFDM, onde  $s \in \{1, 2, \dots, N_s\}$  e  $N_{sc}^{(d)}(s) \leq N_{sc}$ . Seja  $R_j^{(c)}$  a taxa de código associada com o MCS  $j \in \{1, 2, \dots, J\}$ , onde  $J$  é o número total de MCS suportado na transmissão,  $M_j$  é o tamanho da constelação do MCS  $j$  e  $T_s$  é a duração do símbolo OFDM. Então a taxa de bits  $r^{(j)}$  alcançada por um único SB com o MCS  $j$  é dada por:

$$r^{(j)} = \frac{R_j^{(c)} \log_2(M_j)}{T_s N_s} \sum_{s=1}^{N_s} N_{sc}^{(d)}(s) \quad (1)$$

No LTE, o índice CQI (*Channel Quality Indicator*) é definido em termo da taxa de código e esquema de modulação e tem a informação de qual MCS deve ser adotado para o usuário  $k$  durante um TTI (*Transmission Time Interval*). Considerando  $g_{k,n}$  como o indicador de qualidade de canal do  $k$ -ésimo usuário no  $n$ -ésimo SB, então o CQI deste usuário para os  $N$  SBs pode ser expressado como  $g_k = [g_{k,1}, g_{k,2}, \dots, g_{k,n}]^T$  e o CQI para os  $K$  usuários nos  $N$  SBs é dado por  $G = [g_1, g_2, \dots, g_k]^T$ . O máximo CQI do usuário  $k$  para todos SBs é dado por:

$$n^* = \operatorname{argmax}(g_{k,n}), \text{ onde } n \in N \quad (2)$$

Assim  $q_{k,\max}(g_{k,n^*}) \in \{1, 2, \dots, J\}$  é o maior índice MCS alcançado pelo usuário  $k$  no  $n$ -ésimo SB. Considerando que cada SB é atribuído exclusivamente a um único usuário, durante a duração de um TTI. Definimos  $\rho_{k,n}$  como o indicador do SB atribuído para o usuário  $k$  no  $n$ -ésimo SB, então quando  $\rho_{k,n} = 1$ , o  $n$ -ésimo SB é alocado ao usuário  $k$  e  $\rho_{k',n} = 0$ , para  $\forall k' \neq k$ . Definindo  $b_{k,j}$  o indicador da escolha do MCS do usuário  $k$  para todos SBs alocados em um *subframe*, então  $b_{k,j} = 1$  é a escolha do MCS  $j$  para o usuário  $k$  e  $b_{k,l} = 0$  para  $\forall l \neq j$  em um *subframe*. Podemos encontrar a taxa de dados (bits/s) em um *subframe*, como:

$$r_k = \sum_{n=1}^N \rho_{k,n} \sum_{j=1}^{q_{k,\max}(g_{k,n^*})} b_{k,j} r^{(j)} \quad (3)$$

A alocação de recursos de rádio multiusuária ótima tem como objetivo maximizar o somatório (equação 4), que representa a taxa de dados total alcançada em um TTI, sob certas

restrições, que neste caso é o atendimento da taxa mínima exigida pelos usuários para satisfazer QoS:

$$\max \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N \rho_{k,n} \sum_{j=1}^{q_{k,\max}(g_{k,n^*})} b_{k,j} r^{(j)} \quad (4)$$

Sujeito a:

$$r_k \geq R_k, \quad \forall k$$

$$\text{Se } \rho_{k,n}=1, \text{ então } \rho_{k',n}=0, \text{ para } \forall k' \neq k$$

$$\sum_{j=1}^{q_{k,\max}(g_{k,n^*})} b_{k,j} = 1$$

Podemos observar que o somatório (equação 4) é um problema de otimização com complexidade exponencialmente crescente com o número de restrições e variáveis. Com objetivo de diminuir a complexidade do problema, propomos um novo algoritmo de alocação de recursos de rádio para encontrar uma solução sub-ótima.

### 3. Algoritmo PSO

Uma forma de encontrar uma solução para o problema de maximização (equação 4) é utilizando o algoritmo PSO (*Particle Swarm Optimization*), como proposto em (Su, 2012). A otimização PSO é estocástica, sub-ótima, baseada em população e é de fácil implementação. A população é chamada de enxame e cada indivíduo, que corresponde a uma solução para o problema, é chamado de partícula. Na PSO padrão cada partícula possui posição, velocidade e memoriza a melhor posição da partícula encontrada até o momento (também chamada de melhor posição local). A melhor posição de partícula na população, ou seja, a solução com menor custo, também é memorizada. Os vetores velocidade e posição são variáveis contínuas. Na inicialização, cada partícula possui posição e velocidade aleatórias. O algoritmo procura a solução ótima através de atualizações das posições e velocidades de cada partícula, levando em conta as velocidades, as melhores posições das partículas e a melhor posição da população, até um critério de parada. As posições e as velocidades das partículas são atualizadas segundo as equações:

$$v_{t+1} = wv_t + r_1 c_1 (P_t - X_t) + r_2 c_2 (G_t - X_t) \quad (5)$$

$$X_{t+1} = X_t + v_{t+1} \quad (6)$$

onde  $w$  é o peso de inércia;  $c_1$  e  $c_2$  são taxas de aprendizagem;  $r_1$  e  $r_2$  são dois números aleatórios gerados segundo uma distribuição uniforme  $[0;1]$ ;  $v_t$ ,  $X_t$  e  $P_t$  são, respectivamente, a velocidade, a posição e a melhor posição da partícula, no instante de tempo  $t$ ; já  $G_t$  é a melhor posição da população neste instante.

O algoritmo a seguir apresenta o funcionamento da PSO

#### Algoritmo 1: *Particle Swarm Optimization* (PSO)

1ª passo: (Inicialização)

- Inicializar as posições  $X(i)$  e velocidades  $v(i)$  de cada partícula  $i$  com valores aleatórios.
- Definir a melhor posição da partícula  $P(i) = X(i)$ , onde  $i$  é o índice da partícula.
- Calcular o custo  $C(i)$  de cada partícula  $i$  de acordo com a função objetiva.
- Definir o menor custo da partícula (ou seja, o custo de  $P(i)$ )  $C^P(i) = C(i)$ .
- Encontrar na população a partícula com menor custo e definir as variáveis de posição  $G$  e custo  $C^G$  global com os valores dessa partícula.

2ª passo: (Iteração)

- (Opcional) Definir o peso de inércia  $w$ . Em alguns casos, utiliza-se como critério de

parada o número de iterações e faz-se  $w = (maxit - iter) = maxit$ , onde  $maxit$  é o número máximo de iterações e  $iter$  o número da iteração atual.

Para cada partícula  $i$ :

- Gerar números aleatórios  $r_1$  e  $r_2$  segundo uma distribuição uniforme  $[0,1]$ .

- Calcular a nova velocidade da partícula segundo a equação:

$$v(i) = wv(i) + r_1c_1(P(i) - X(i)) + r_2c_2(G - X(i)) \quad (7)$$

- Calcular a nova posição da partícula segundo a equação:

$$X(i) = X(i) + v(i) \quad (8)$$

- Avaliar o custo da partícula  $C(i)$  segundo a função objetiva.

- Se o custo atual da partícula  $C(i)$  for inferior ao menor custo da partícula  $C^P(i)$ , ou seja,  $C(i) < C^P(i)$ , defina  $C^P(i) = C(i)$  e  $P(i) = X(i)$ .

- Se o menor custo da partícula  $C^P(i)$  for inferior ao menor custo global  $C^G$ , ou seja,  $C^P(i) < C^G$ , defina  $C^G = C^P(i)$  e  $G = X(i)$ .

3ª passo: (Critério de Parada)

- Avaliar o critério de parada (um critério de parada é o número de iterações).

- Parar o algoritmo se o critério de parada for satisfeito, a melhor solução encontrada é  $G$ . Ir para o passo 2 caso contrário.

O vetor solução  $x$ , que representa o usuário alocado a cada bloco escalonado, é inteiro, sendo adequado utilizar a versão modificada da PSO, que discretiza a posição e a velocidade das partículas (Wang, 2008) segundo a equação:

$$INT(r) = \begin{cases} floor(r), & se\ rand > r - floor(r) \\ ceil(r), & caso\ contrário \end{cases} \quad (9)$$

onde  $floor(r)$  e  $ceil(r)$  são funções de arredondamento para o maior inteiro menor que  $r$  e menor inteiro maior do que  $r$ , respectivamente, e  $rand$  é um número aleatório gerado segundo uma distribuição uniforme  $[0,1]$ .

A PSO padrão não possui restrições, assim, a restrição de taxa mínima dos usuários para garantir QoS é convertida em uma função de penalidade. A função de penalidade transforma um problema de otimização com restrição em uma otimização sem restrição.

$$Penalidade = \sum_{k=1}^K [\min(0, r_k - R_k)]^2 \quad (10)$$

O algoritmo PSO realiza a otimização avaliando os custos de cada solução (partícula) através da função objetivo (11). Os menores custos são memorizados, por partícula da população, e utilizados no algoritmo.

$$F = \sum_{k=1}^K r_k(t) - \sum_{k=1}^K [\min(0, r_k - R_k)]^2 \quad (11)$$

#### 4. Algoritmo de Alocação de Recursos Proposto

Com objetivo de reduzir a complexidade computacional do problema (4) e aumentar o índice de justiça (*fairness*), tendo em vista a garantia de QoS dos usuários, é proposto um novo algoritmo para alocação de recursos de rádio no sistema LTE. O algoritmo proposto é dividido em duas etapas: (A) Estima-se a quantidade de SBs por usuário, tendo em vista a taxa mínima requerida por eles; (B) Aloca-se os SBs para cada usuário de acordo com uma prioridade calculada. A seguir é descrito os detalhes de cada etapa.

A quantidade de SBs que cada usuário precisa pode ser calculada baseada na taxa mínima requerida. Seja  $N_k$  o número de SBs alocados para o usuário  $k$ ,  $N_k$  é calculado da

seguinte forma:

$$N_k = \text{round} \left( \left( \frac{R_k}{R_1 + R_2 + \dots + R_k} \right) * N \right) \quad (12)$$

onde  $N$  é a quantidade de SBs disponíveis para o *downlink* LTE e  $\text{round}(x)$  é uma função de arredondamento para o inteiro mais próximo de  $x$ .

No sistema LTE, todos SBs atribuídos a um usuário devem adotar o mesmo MCS. Quando os SBs alocados a um usuário apresentam diferentes qualidades de canal, em termo de CQI (*Channel Quality Indicator*), deve ser escolhido o MCS de acordo com o pior CQI para que a transmissão de cada SB seja corretamente recebida. Isto resulta em uma degradação na taxa de dados do usuário (Guan, 2011). No algoritmo proposto, o usuário com a maior taxa mínima de dados requerida recebe recurso primeiro. Após a alocação da quantidade de SBs estimada na etapa anterior (A), alguns usuários podem não ter atingido a taxa mínima necessária, assim, os SBs remanescentes são atribuídos a cada usuário até atingir a taxa mínima requerida, considerando uma certa prioridade. Quanto maior for a diferença entre a taxa mínima requerida e a taxa alcançada pelo usuário, maior é a sua prioridade.

Se todos usuários atingirem a taxa mínima requerida (QoS), os SBs remanescentes são atribuídos aos usuários considerando a média de ganho do canal, assim, o usuário com a melhor média tem maior prioridade. A média de ganho do canal é calculada da seguinte forma:

$$\mu_k = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N g_{k,n} \quad (13)$$

Com o objetivo de minimizar a perda máxima possível do sistema, tendo em vista que a garantia de QoS nem sempre é atendida, é utilizado o critério Max-min. O algoritmo proposto utiliza o critério Max-min, para que haja um escalonamento justo para os usuários com a menor perda possível. O critério Max-min escolhe a ação com o "melhor" pior resultado (Winston, 2003).

A seguir é descrito com detalhes o algoritmo proposto de alocação de recursos no sistema LTE:

Algoritmo 2: Algoritmo de alocação de recursos proposto
---

1º passo: (Entrada de dados)

- $K$  = números de usuários;
- $N$  = números de blocos de escalonamento (SBs);
- $G$  = informação da qualidade de canal (CQI) de todos os usuários, matriz( $N \times K$ );
- $R$  = taxa mínima requerida de todos usuários (vetor  $1 \times K$ );

2ª passo: (Inicialização)

- $W = \{1, 2, \dots, N\}$ ;
- $S_k = \{\}, k \in \{1, 2, \dots, K\}$ ;
- $r_k = \{\}, k \in \{1, 2, \dots, K\}$ ;
- Calcula  $N_k$  conforme (12)
- Calcula prioridade1 (prioridade1 = ordem decrescente do vetor  $R$ );
- Para  $k = 1$  até  $K$ ;

3º passo: Usuário = prioridade1( $k$ );

- Escolhe  $N_k$  SBs do usuário conforme (2), na condição  $W \neq \{\}$ , e colocam em  $S_k(\text{usuário})$ ;
- $k = k+1$ ;
- Se  $k < K$  volta ao passo 3;
- Determina o maior MCS que pode ser adotado para cada usuário entre todos SBs atribuídos a eles;
- Calcula a taxa alcançada dos usuários;



- Calcula  $prioridade_2$  ( $prioridade_2$  = ordem decrescente da diferença entre a taxa mínima requerida pelos usuários e a taxa alcançada);
  - Para  $k = 1$  até  $K$ ;
- 4º passo: Usuário =  $prioridade_2(k)$ ;
- 5º passo: Escolhe um SB para o usuário conforme (2), na condição  $W \neq \{\}$ , e coloca em  $S_k(\text{usuário})$ ;
- Determina o maior MCS que pode ser adotado para o usuário  $k$  entre todos SBs atribuídos a ele;
  - Calcula a taxa de dados do usuário;
  - Se taxa alcançada do usuário < taxa requerida do usuário, vai para o passo 5;
  - $k = k+1$ ;
  - Se  $k < K$  volta ao passo 4;
  - Calcula  $prioridade_3$  ( $prioridade_3$  = ordem decrescente do ganho médio do canal dos usuários, calculados conforme (13));
  - Enquanto  $W \neq \{\}$ ;
  - Para  $k = 1$  até  $K$ ;
- 6º passo: Usuário =  $prioridade_3(k)$ ;
- Escolhe um SB para o usuário conforme (2), na condição  $W \neq \{\}$ , e coloca em  $S_k(\text{usuário})$ ;
  - Se  $W \neq \{\}$ ,  $k = k+1$  e vai para passo 6, caso contrário vai para passo 7;
- 7º passo: Determina o maior MCS que pode ser adotado para cada usuário entre todos SBs atribuídos a eles;
- Calcula a taxa final de dados dos usuários;

## 5. Resultados e Simulações

### A. Parâmetros do Sistema

Foram realizadas simulações considerando os dados da Tabela 1. As condições de canal dos usuários para cada bloco de escalonamento, em termos de SNR (*signal-to-noise-ratio*), foram geradas aleatoriamente, através de uma distribuição normal com média e desvio padrão igual a 15 e 5, respectivamente. Os esquemas de modulação e código (MCS) associados aos SNR é mostrado na tabela 2 (Huang, 2011).

Tabela1: Configuração do sistema LTE

Número total de subportadoras	300
Número de SBs	25
Tamanho do <i>subframe</i>	1ms
Tamanho do canal	5MHz
Símbolos OFDM por <i>slot</i>	7
Taxa mínima requerida	1,024; 0,768; 1,536 (Mbits/s)
Esquema de modulação e código (MCS)	QPSK: 1/2, 2/3, 3/4 16QAM: 1/2, 2/3, 3/4 64QAM: 2/3, 3/4
TTI simulados	100

Tabela 2: SNRs associadas aos MCS (Huang, 2011)

Nível MCS	SNR (dB)	MCS
1	1,7	QPSK (1/2)
2	3,7	QPSK (2/3)
3	4,5	QPSK (3/4)
4	7,2	16QAM (1/2)
5	9,5	16QAM (2/3)
6	10,7	16QAM (3/4)
7	14,8	64QAM (2/3)
8	16,1	64QAM (3/4)

Nas próximas subseções, é apresentada uma comparação de desempenho em termos de vazão, taxa de perda e índice de justiça, para o algoritmo PSO (Su, 2012), para o algoritmo apresentado em (Guan, 2011), que denominamos de *QoS Guaranteed*, e para o algoritmo proposto. É assumido que as informações de CQI são totalmente conhecidas na estação base.

### B. Vazão (*Throughput*) do Sistema e Índice de Justiça

A média de vazão do sistema em função da quantidade de usuários, considerando 100 TTIs, é mostrada na figura 2. Pode-se observar que o algoritmo *QoS Guaranteed* apresenta um desempenho inferior em termos de vazão entre os três algoritmos, sendo que o algoritmo PSO apresenta o melhor resultado. Quando a quantidade de usuário é igual a 12 ou superior, o algoritmo proposto apresenta um desempenho similar ao do algoritmo PSO.

O maior valor de vazão (*throughput*) alcançado pelo algoritmo PSO foi à custa de sua maior complexidade computacional e menor índice de justiça, como pode ser observado na figura 3. O algoritmo PSO é quase 20 vezes mais lento do que o algoritmo proposto, conforme mostra a Tabela 3, e possui índice de justiça mais dependente da quantidade de usuários. Para o cálculo do tempo computacional mostrado na Tabela 2, foi utilizado um computador com processador core 2 duo de 1,8GHz, com 4GB de memória RAM.

O índice de justiça, considerando a taxa mínima requerida pelos usuários como restrição, foi calculado pela seguinte equação (Jain, 1999):

$$\text{Índice Fairness} = \frac{[\sum_{i=1}^k x_i]^2}{k \sum_{i=1}^k x_i^2} \quad (14)$$

onde  $x_i = \frac{r_i}{R_i}$  é a vazão normalizada e,  $r_i$  e  $R_i$  é a taxa de dados alcançada e taxa mínima requerida para o usuário  $i$ , respectivamente.

Os valores do índice de justiça do algoritmo proposto são em geral maiores do que os dos algoritmos *QoS Guaranteed* e PSO. Isso se deve à utilização da prioridade variável do algoritmo, que sempre busca priorizar os usuários ainda não atendidos pela taxa mínima requerida.

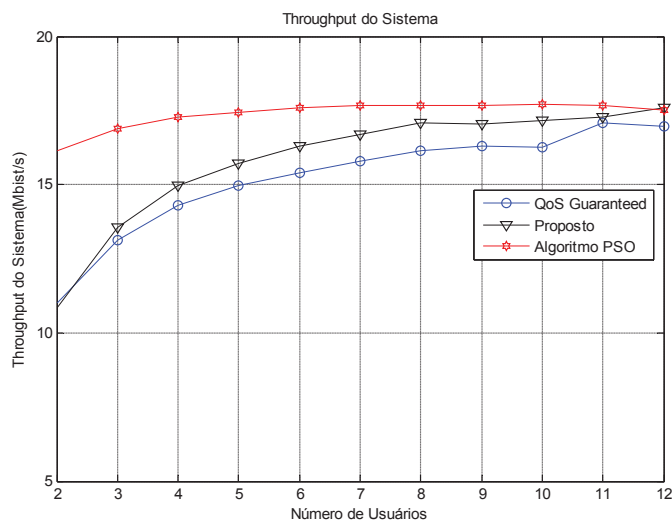


Fig 2. *Throughput* (Mbits/s) do algoritmo proposto, *QoS Guaranteed* e algoritmo PSO



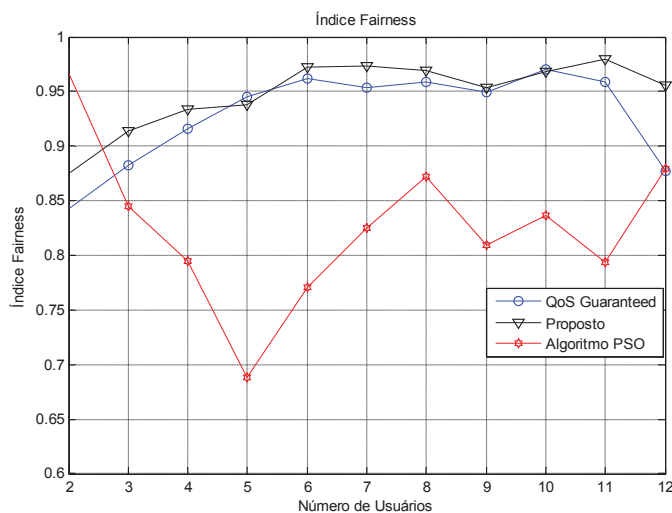


Fig 3. Índice de justiça do algoritmo proposto, *QoS Guaranteed* e algoritmo PSO

Tabela3: Tempo computacional

Tempo Computacional (12 usuários, 1 TTI)	
<i>QoS Guaranteed</i>	0,022s
Algoritmo PSO	0,461s
Algoritmo Proposto	0,024s

### C. Taxa de perda do Sistema

A taxa de perda do sistema, apresentada na figura 4, foi calculada considerando a média estatística de 100 TTIs. Esta taxa mostra em termos percentuais a perda de dados do sistema em função da quantidade de usuários. Pode-se observar que o algoritmo proposto apresenta em geral a menor taxa de perda de dados em comparação aos outros 2 algoritmos considerados, sendo superado pelo algoritmo PSO apenas com 5 e 8 usuários.

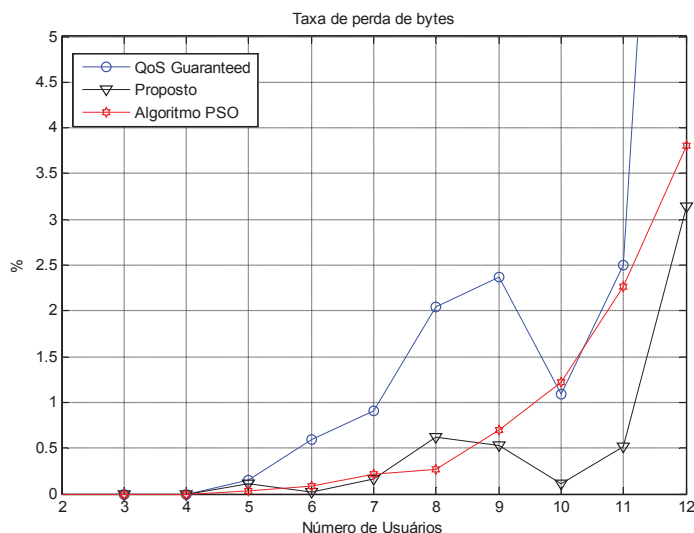


Fig 4. Taxa de Perda de dados do algoritmo proposto, *QoS Guaranteed* e algoritmo PSO

## 6. Conclusão

Foi proposto neste trabalho um algoritmo para alocação de recursos de rádio para o sistema de *downlink* LTE, considerando a garantia de parâmetros de QoS (taxa mínima) e atendimento de critério de justiça. As simulações realizadas comprovaram uma melhora considerável no índice de justiça e na taxa de perda de dados, quando comparada com os algoritmos apresentados em (Guan, 2011) e (Su, 2012). O algoritmo proposto ainda superou, em termos de vazão total do sistema, o algoritmo *QoS Guaranteed*. Com relação a complexidade computacional, medida pelo tempo de processamento dos algoritmos, foi observado que o algoritmo proposto é similar ao *QoS Guaranteed* e possui um tempo computacional bem inferior ao do algoritmo PSO.

Sugerimos para futuras pesquisas, a aplicação do algoritmo proposto com a utilização de um modelo de canal e de perda de percurso, para estimar o SNR dos usuários, além do cálculo de banda efetiva de tráfegos reais, para estimar a taxa mínima requerida de cada usuário.

## Referências

- 3GPP TSG RAN TR 25.913 v8.0.0**, *Requirement for Evolved Universal Terrestrial Radio Access (UTRA) and Universal Terrestrial Radio Access Network (UTRAN)*, 2008.
- Dahlman E., Parkvall S., Beming P.**, *3G Evolution HSPA and LTE for Mobile Broadband*, Elsevier, Great Britain, Pag. 317 e 321, 2007.
- Guan, Na; Zhou, Yiqing; Tian, Lin; Sun, Gang; Shi, Jinglin**, *QoS guaranteed resource block allocation algorithm for LTE systems*. Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob), IEEE 7th International Conference on, Pag. 307-312, 2011.
- 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, Pag. 445-449, 2011.
- Jain, Raj; Durreesi, Arjan; Babic, Gojko**, *Throughput Fairness Index: An Explanation*, Department of CIS, The Ohio State University, ATM\_Forum/99-0045, 1999.
- Su, Lin; Wang, Ping; Liu, Fuqiang**, *Particle swarm optimization based resource block allocation algorithm for downlink LTE systems*. Communications (APCC), 18th Asia-Pacific Conference on, Pag. 970-974, 2012.
- Wang, J. H.; Yin, Z.Y.**, *A ranking selection-based particle swarm optimizer for engineering design optimization problems*. Structural and Multidisciplinary Optimization, Volume 37, Issue 2, pp 131-147, 2008.
- Winston, L. Wayne**, *Operations Research: Applications and Algorithms*, Duxbury Press, Pacific Grove, 2003.
- Yang, B.; Letaief, K.B.; Cheng, R.S.; Cao, Z.**, *Channel estimation for OFDM transmission in multipath fading channels based on parametric channel modeling*, IEEE Trans. Commun., vol. 49, 467-479, 2001.