

Resource Allocation in f-OFDM Wireless Networks with Delay Estimation Using Service Curve and Envelope Process

M. Ferreira, and F. Vieira

Abstract—In this paper, a resource allocation algorithm for wireless communication systems is proposed, which considers the channel transmission quality and data delay. In the proposed approach, the delay value is estimated to decide on the allocation of available radio resources, aiming to reduce the system's average delay. For the delay estimation, an approach involving concepts of Network Calculus such as service curve and envelope process MFBAP (Multifractal Bounded Arrival Process) is proposed. In view of the recent techniques for 5G communication systems, f-OFDM (filtered-Orthogonal Frequency Division Multiplexing) technology is also considered in our simulation scenarios. Simulations are carried out to compare the performance of the resource allocation algorithms in terms of QoS (Quality of Service) parameters such as average delay, throughput, processing time, loss rate and fairness index, proving the efficiency of the proposed algorithm.

Index Terms—f-OFDM, QoS, Envelope process, Service curve.

I. INTRODUÇÃO

NESTE artigo, o cenário de alocação de recursos para sistemas de comunicação sem fio é desenvolvido com base na tecnologia da próxima geração de redes f-OFDM (*filtered-Orthogonal Frequency Division Multiplexing*, Multiplexação por Divisão de Frequência Ortogonal filtrada), com objetivo de melhorar a taxa de transmissão de dados para suportar redes sem fio da próxima geração. Esta tecnologia possibilita uma operação fragmentada do espectro e a coexistência eficiente de múltiplas sub-bandas a fim de melhorar a utilização do espectro [1] [2]. A escolha da tecnologia f-OFDM se justifica por melhorar a taxa de transferência do sistema em 10% ao usar as bandas livres das redes LTE (*Long Term Evolution*, Evolução de Longo Prazo), além de suportar a transmissão assíncrona de diferentes usuários e ser compatível com a tecnologia MIMO (*Multiple Input Multiple Output*, Múltiplas Entradas Múltiplas Saídas) [3].

Há várias propostas de esquemas de alocação de recursos em redes sem fio [4] [5] [6]. Em [4], é proposto um algoritmo para alocação de blocos de recursos em redes sem fio baseado na heurística PSO (*Particle Swarm Optimization*, Otimização por Enxame de Partículas), com o objetivo de maximizar a vazão total do sistema. Em [5], é proposto um algoritmo com o objetivo de garantir o critério de taxa mínima de

transmissão requerida pelo usuário. Em [6], é proposto um algoritmo com o objetivo de minimizar o parâmetro de retardo e atender critérios de QoS (*Quality of Service*, Qualidade de Serviço). Estes esquemas de alocação, em adição a outros não mencionados, tem o mesmo propósito de maximizar a vazão total através de heurísticas que focam em diferentes parâmetros de QoS como retardo, taxa mínima, dentre outros.

Neste artigo, propõe-se um algoritmo que tem como objetivo reduzir 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*, Voz sobre Protocolo Internet) 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 [6] [7] 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 abordagem proposta de estimação de retardo são utilizados conceitos de curva de serviço e processo envelope MFBAP (*Multifractal Bounded Arrival Process*, Processo de Chegada Limitado Multifractal) [8].

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 limitante de retardo; na Seção III é apresentado o modelo de transmissão *downlink*; na Seção IV é apresentada a tecnologia f-OFDM com suas vantagens e desvantagens; na Seção V é proposto o algoritmo de alocação de blocos de recurso em redes sem fio; na Seção VI são apresentados os parâmetros de simulação e os resultados; na Seção VII 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 [9].

O Cálculo de Rede também pode ser visto como a teoria de sistemas que se aplica às redes de computadores, mas

M. V. G. Ferreira, Instituto de Informática, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, Goiás, Brasil, marcusferreira@inf.ufg.br.

F. H. T. Vieira, Instituto de Informática, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, Goiás, Brasil, flavio@emc.ufg.br.

Corresponding author: Marcus Vinícius Gonzaga Ferreira.

a principal diferença é considerar-se outra álgebra, onde as operações são alteradas da seguinte forma: adição torna-se o cálculo do mínimo, e a multiplicação torna-se adição.

A. Processo Envelope MFBAP

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, 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 [9]:

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

onde \sup é um operador que retorna o valor máximo de $A[s, s + t]$ sem estabelecer valor limite superior, sendo $s \geq 0$ neste caso.

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

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

onde $H(t)$ é o expoente de Hölder [10], que representa o grau da singularidade da função, 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 de retardo estimado, denotado por \hat{d} , é dado por [8]:

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

onde \inf é um operador que retorna, neste caso, o menor valor de $d \geq 0$ que atende $A^*(t - d) \leq S(t)$.

Assim, propõe-se neste artigo utilizar essa equação para estimar o retardo, onde A^* é o processo envelope MF-BAP, calculado conforme Equação (2), e S é a curva de serviço do sistema. Considerando um sistema OFDMA-TDMA (*Orthogonal Frequency-Division Multiple Access/Time Division Multiple Access*, Acesso Múltiplo por Divisão de Frequência Ortogonal/Acesso Múltiplo por Divisão de Tempo) com escalonamento Round-Robin, generalizada para qualquer usuário servido pelo mesmo intervalo de tempo T , sua curva de serviço pode ser escrita como [11]:

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

onde c 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 dado por $P = \lfloor \frac{t}{NT} \rfloor$, onde o operador representa o menor número inteiro mais próximo de $\frac{t}{NT}$.

A Figura 1 mostra os valores médios de retardo estimados dos dados dos usuários conforme Equação (3) e os valores de retardo real observados nas simulações para diferentes

distâncias considerando o escalonamento Round-Robin e o escalonamento proposto neste artigo para cenários distintos de uma rede sem fio OFDM com largura de banda de 5 MHz. Os demais parâmetros de simulação do sistema de transmissão sem fio e da modelagem do canal são descritos na Tabela II.

Observa-se que os valores estimados são em geral similares aos valores de retardo do algoritmo proposto neste artigo, um pouco superiores se considerado até 5 usuários em simulação, enquanto os valores de retardo com escalonamento Round-Robin são em geral superiores aos demais.

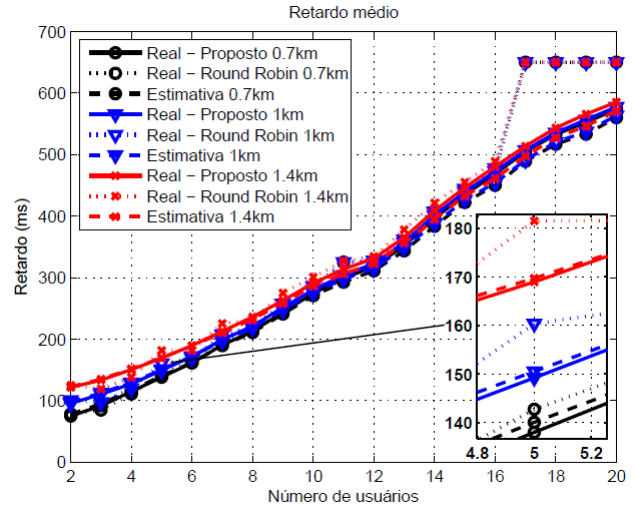


Fig. 1. Valores médios de retardo estimado e real para o escalonamento Round-Robin e escalonamento proposto, considerando cenários com distância entre UE (*User Equipment*) e BS (*Base Station*) de 0.7, 1 e 1.4 km.

III. MODELO DE TRANSMISSÃO Downlink

A. Estrutura do Frame de Rádio

A estrutura de um *frame* de transmissão *downlink* é mostrado na Figura 2. Cada *frame* de rádio ocupa 10 ms, que são divididos em dez *subframes* de 1 ms [5]. Cada *subframe* por sua vez é dividido em dois *slots* de tempo de 0.5 ms. Há sete ou seis símbolos para cada *slot* de tempo, dependendo da utilização de, respectivamente, prefixo ciclo ((CP, *Cyclic Prefix*) normal ou estendido [5].

No domínio da frequência os recursos são agrupados em 12 subportadoras de 15 kHz, totalizando um largura de banda de 180 kHz. Um bloco de recurso (RB, *Resource Block*) é definido como uma unidade de 12 subportadoras durante um *slot* de tempo [12], e estes são escalonados sempre em pares de RBs, chamados assim de blocos de escalonamento (SB, *Scheduling Block*), com duração de 1 ms.

B. Modelo do Sistema

Considerando um cenário de transmissão *downlink* de um sistema com uma antena, N blocos de recursos disponíveis por TTI (*Transmission Time Interval*, Intervalo de Tempo de Transmissão), quantidade de potência distribuída igualmente entre todas as subportadoras e K usuários servidos a taxas mínimas R_k . Um bloco de recurso é definido como N_s

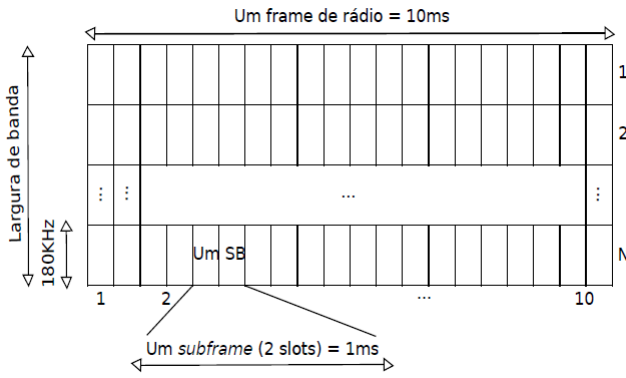


Fig. 2. Estrutura básica de um *frame* no domínio do tempo e frequência.

símbolos consecutivos no domínio do tempo e N_{sc} subportadoras no domínio do tempo. Considerando que existem sinais pilotos e de controle nos blocos de recursos, apenas $N_{sc}^d(s)$ subportadoras podem ser utilizadas para transferência de dados no s -ésimo símbolo, 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 ao MCS (*Modulation and Coding Scheme*, Esquema de Modulação e Codificação) $j \in \{1, 2, \dots, J\}$, onde J é o número total de MCS suportados, M_j o tamanho da constelação do MCS j e T_s o tempo do símbolo, a taxa de bits de um bloco de recursos $r^{(j)}$ alcançada para o MCS j é dada por:

$$r^{(j)} = \frac{R_j^{(c)} \log_2(M_j)}{T_s N_s} \sum_{s=1}^{N_s} N_{sc}^d(s). \quad (5)$$

O CQI (*Channel Quality Indicator*, Indicador de Qualidade do Canal) é informado pelo usuário ou pode ser estimado por meio de algoritmos de estimação de canal, a fim de não sobrecarregar o canal de *uplink*. A partir do CQI são definidas a taxa de código e o esquema de modulação, ou seja, a informação de qual MCS deve ser adotado para o usuário k no bloco de recurso n . Neste artigo, a taxa de código e o índice MCS associados com a SINR (*Signal-to-Interference-plus-Noise-Ratio*, Relação Sinal-Ruído e Interferência) são determinados através do mapeamento da tabela de CQI de 4 bits conforme [13].

Cada SB é alocado a apenas um usuário em um TTI. Seja $q_n(i) \in \{1, 2, \dots, K\}$ o usuário alocado no bloco de recurso n no TTI i . A taxa de bits nesse bloco de recurso depende do MCS do usuário, logo a taxa de bits do mesmo bloco de recurso pode ser diferente para cada usuário. Alocar os blocos de recursos aos usuários com maiores taxas de bits tende a aumentar a utilização da rede.

Seja $x(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_N(t)]$ o vetor de tamanho N , composto pelos elementos $x_n(t)$, $n \in N$, que associa cada bloco de recurso a um usuário no instante de tempo t , por exemplo, se $x_1(t) = 2$, o bloco de recurso 1 está alocado para o usuário 2 no instante de tempo t ; $m_{k,n}(t)$ o MCS adotado para o usuário k no bloco de recurso n no instante de tempo t , a taxa de bits do usuário k , r_k , no instante de tempo t é

dada por:

$$r_k(t) = \sum_{n=1}^N I(x[n] = k) r^{(m_{k,n}(t))}, \quad (6)$$

onde $I(x[n] = k)$ é 1 se $x[n] = k$ e 0 caso contrário. A taxa de bits total T_b do sistema é:

$$T_b(t) = \sum_{k=1}^K r_k(t). \quad (7)$$

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:

$$(x) : \max T_b, \quad (8)$$

sujeito a:

$$r_k \geq R_k \quad \forall k. \quad (9)$$

IV. FORMA DE ONDA F-OFDM

Para suportar a diversidade crescente de serviços futuros providos pelas redes 5G, é esperado que a largura de banda do sistema seja dividida em várias sub-bandas, onde a estrutura do quadro dentro de cada sub-banda possa ser configurada de acordo com o tipo individual de tráfego e a condição do canal [3] [2]. A forma de onda denominada f-OFDM possibilita tal fatiamento do espectro e permite a coexistência de múltiplas sub-bandas [2] [14].

A principal ideia da forma de onda f-OFDM é reduzir a interferência entre as sub-bandas adjacentes, e, para tal, o sinal OFDM de banda base de cada sub-banda é filtrado por um filtro de banda limitada para suprimir a emissão fora de banda. A estrutura em cada sub-banda, incluindo o espaçamento de subportadora, o tamanho do prefixo cíclico e o TTI, pode ser configurada para alcançar o objetivo relacionado a cada tipo de serviço. Por exemplo, a estrutura para a sub-banda da banda larga móvel aperfeiçoada (eMBB, *Enhanced Mobile Broadband*) poderia almejar alta eficiência espectral, enquanto para a comunicação de ultra-confiabilidade e baixa latência (uRLLC, *Ultra-Reliability and Low Latency Communication*) poderia almejar baixa latência com espaçamento entre subportadora mais largo e menor TTI [2].

Outra vantagem da forma de onda f-OFDM é suportar a transmissão assíncrona multi-usuário no *uplink*. Através da filtragem por UE (*User Equipment*, Equipamento do Usuário) para suprimir a perda fora da banda, a interferência entre UEs se torna negligível. No LTE, o sinal de avanço de tempo (TA, *Timing Advance*) enviado para cada UE pela estação base (BS, *Base Station*) resulta em larga sobrecarga de sinalização, especialmente quando um grande número de usuários está presente. Introduzindo a filtragem por UE para suprimir a interferência entre UE, as UEs não necessitam manter uma sincronização rigorosa com a BS para explorar a ortogonalidade do OFDM, e a sobrecarga de sinalização de avanço de tempo pode ser reduzida [3].

Entre as desvantagens da forma de onda f-OFDM, pode-se citar o fato dela requerer um par adicional de filtros de transmissão e recepção respectivamente no transmissor e no receptor em comparação com o OFDM convencional, acarretando maior custo. A interferência entre portadoras (ICI, *Inter-Carrier Interference*) também continua existindo assim como no OFDM padrão, uma vez que a filtragem não é suficiente para eliminá-la [14].

Nas especificações do LTE, 10% da largura de banda do sistema está reservada como banda de guarda em uma portadora base, para suportar a taxa de perda de canal adjacente (ACLR, *Adjacent Channel Leakage Ration*) e o requisito de espectro [2]. Aplicando f-OFDM, o sinal OFDM de banda base pode ser configurado com uma região de transição ultra estreita, e assim a banda de guarda pode ser reutilizada para transmitir sinais de dados, resultando em uma utilização eficiente do espectro [14].

Entre as formas de onda candidatas para as redes 5G, destacam-se as seguintes: GFDM (*Generalized Frequency Division Multiplexing*, Multiplexação por Divisão de Frequência Generalizada) [15], FBMC (*Filter Bank Multi-Carrier*, Banco de Filtro de Multi-Portadora) [16] e UFMC (*Universal Filtered Multi-Carrier*, Filtro de Multi-Portadora Universal) [17]. A motivação para estas formas de onda é similar a motivação da f-OFDM, ou seja, reduzir a interferência entre as sub-bandas adjacentes e minimizar os requisitos para sincronização. Para atender o propósito, são aplicados filtros para todas estas formas de onda, porém com métodos e performances diferentes.

No geral, o f-OFDM desponta como uma das formas de onda mais promissoras para as redes 5G, provendo vantagens do OFDM como multiplexação em frequência flexível, simples equalização do canal e fácil combinação com o cenário de transmissão multi-antenas, além das demais vantagens citadas anteriormente [14].

V. ALGORITMO DE ALOCAÇÃO DE BLOCOS DE RECURSO PROPOSTO

Em [6], é proposto um algoritmo de escalonamento que procura minimizar o retardo em redes sem fio. A principal diferença do algoritmo apresentado em [6] 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 conceitos de Cálculo de Rede, conforme explicado na Seção II. No algoritmo apresentado em [6] 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 a prioridade, o limitante de retardo estimado, calculado conforme Equação (3), e o critério de retardo máximo, definido conforme Tabela I;
- 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:

$$G_k = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N g_{k,n}, \quad (10)$$

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*.

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

$$N_k = \text{round} \left(\left(\frac{G_k}{G_1 + G_2 + \dots + G_k} \right) * N \right), \quad (11)$$

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

Após calculado a prioridade de alocação, os SBs com maior CQI 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 I, 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 para cada usuário, ou seja, os usuários com maior valor de retardo tem maior prioridade. O objetivo é reduzir o retardo médio depois de satisfeito o critério.

VI. SIMULAÇÕES E RESULTADOS

Nesta seção são apresentados os resultados das simulações do algoritmo de alocação proposto, comparando com o algoritmo PSO, o algoritmo QoS *guaranteed* [5] e o algoritmo *Min-delay* [6].

O algoritmo denominado de PSO (*Particle Swarm Optimization*) [4] neste trabalho consiste na aplicação do algoritmo de enxame de partículas para solução do problema de otimização representado pelas Equações (8) e (9). Já os algoritmos QoS *guaranteed* [5] e *Min-delay* [6] buscam reduzir a complexidade computacional do problema de otimização representado pelas Equações (8) e (9), 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 R2018a, utilizando um microcomputador com a seguinte configuração: Processador Intel Core I7-4785T CPU 2.20GHz, 8GB RAM, HD SATA III 7200 RPM, Windows 10 64bits.

A. Modelo de Canal e Parâmetros do Sistema

As condições do canal para cada usuário e SB em termos de SINR foram gerados para 10000 TTIs através da seguinte equação [18]:

$$SINR = \frac{G_o P_o}{\sum_{j=1}^J G_j P_j + \sigma_n^2}, \quad (12)$$

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.

A taxa de bit e o índice MCS associado ao SINR são definidos com CQI de 4 bits conforme [19]. A Tabela I apresenta os valores de critério de retardo máximo adotados em simulação e a Tabela II apresenta os parâmetros de transmissão *downlink* no sistema e o modelo de canal considerado.

TABELA I
VALORES DE CRITÉRIO DE RETARDO MÁXIMO ADOTADOS

Número de usuários	Retardo (ms)
até 10	300
entre 10 e 25	500
mais de 25	600

TABELA II
PARÂMETROS DE SIMULAÇÃO PARA MODELAGEM DE CANAL E SISTEMA

Parâmetro	Valor
Largura de banda	10 MHz
Número de TTIs simulados	10000
Taxa mínima requerida (R_k)	1.024 Mbits/s
Tamanho de <i>buffer</i> por usuário	60 kB [8]
Modelo multipercursos	Rayleigh [18]
Perfil de atraso multipercursos	Urbano Típico Estendido (ETU) [12]
Modelo de perda de percurso	$L = 128.1 * 37.6 \log_{10}(R)$, R em km [20]
Distância entre UE e BS	1 km [20]
Densidade de potência do ruído branco	-174 dBm/Hz [20]
Potência máxima do transmissor BS	46 dBm [20]
Ganho da antena BS após perda no cabo	15 dBi [20]
Ganho da antena UE	0 dBi [20]
Figura de ruído UE	9 dB [20]
Margem de interferência UE	4 dB [20]

Foram consideradas cinco séries reais de tráfego TCP/IP (*Transmission Control Protocol/Internet Protocol*, Protocolo de Controle de Transmissão/Protocolo Internet) para representação dos usuários em 10000 TTIs durante a

simulação, agregadas no domínio do tempo em intervalos de 100 ms. 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 <http://wand.net.nz/wits/waikato/8/>).

B. Resultados

Considerando os parâmetros de transmissão *downlink* e do modelo de canal dados na Tabela II, avalia-se nesta seção o desempenho do algoritmo de escalonamento proposto em comparação com outros da literatura.

A Tabela III mostra a taxa de atendimento ao critério de retardo máximo, definido conforme Tabela I, considerando de 5 a 40 usuários em 10000 TTIs simulados. Nota-se que o algoritmo proposto garante 95.61% de taxa de atendimento. Os valores de critério de retardo máximo foram definidos com base em valores observados em simulação. Nas simulações apresentadas nesta seção, foram considerados para o algoritmo PSO os parâmetros utilizados no cenário descrito em [4]: 30 indivíduos, 100 iterações como critério de parada, peso de inércia $w = \frac{(100-i)}{100}$, sendo i o número de iterações, $c_1 = c_2 = 2$.

TABELA III
TAXA DE ATENDIMENTO AO CRITÉRIO DE RETARDO MÁXIMO

Algoritmo	Taxa (%)
QoS <i>guaranteed</i>	88.18
PSO	77.29
Proposto	95.61
<i>Min-delay</i>	95.16

A Figura 3 mostra que o retardo médio por usuário é significativamente menor para o algoritmo proposto do que os algoritmos QoS *guaranteed* e PSO se considerado mais de 28 usuários em simulação, com valores similares ao algoritmo *Min-delay*.

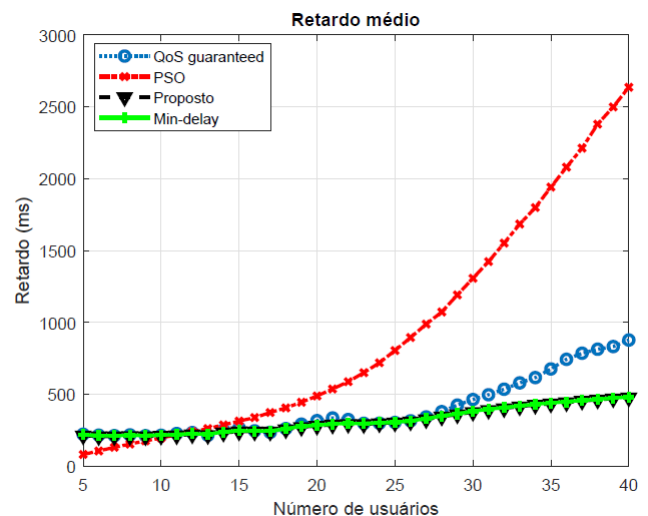


Fig. 3. Retardo médio em função do número de usuários.

O algoritmo PSO apresenta maiores valores de vazão total se considerado até 14 usuários, conforme pode ser visto na Figura 4. Este fato era esperado visto o algoritmo PSO ser uma heurística de maximização da vazão total em detrimento do elevado tempo de processamento. Porém o desempenho do algoritmo PSO decai para mais de 14 usuários, devido a sua função objetivo que considera o critério de taxa mínima requerida. O algoritmo proposto apresenta valores de vazão total similares aos valores apresentados pelo algoritmo *Min-delay* e maiores do que os valores apresentados pelo algoritmo *QoS guaranteed*.

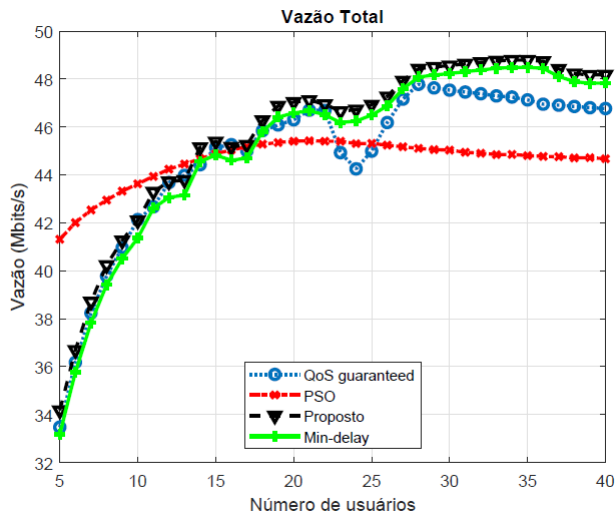


Fig. 4. Vazão total em função do número de usuários.

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 guaranteed* e *Min-delay*, conforme pode ser visto na Tabela IV.

O maior tempo de processamento do algoritmo PSO comparado aos dos outros algoritmos considerados pode ser explicado devido a sua maior complexidade computacional. A complexidade computacional do algoritmo baseado na heurística PSO deve ser analisada considerando os laços, ou *loops*, para busca da melhor solução. Estes laços são definidos pelo número de iterações *maxit*, o tamanho da população P_o e o tamanho da matriz de dados de entrada $N \times K$, sendo N a quantidade de blocos de escalonamento disponíveis e K a quantidade de usuários no sistema. Assim, a complexidade computacional do algoritmo do escalonador baseado em PSO é igual a $O(N \times K \times P_o \times maxit)$.

Em relação à complexidade computacional dos algoritmos *QoS guaranteed*, *Min-delay* e do algoritmo proposto, considera-se a quantidade de blocos de escalonamento da rede N e o número de usuários K apenas, uma vez que não são aplicadas heurísticas de otimização nestes algoritmos. A alocação nestes cenários se baseia apenas na estimativa do número de blocos e na verificação dos parâmetros de QoS, ambos com complexidade $O(1)$. A complexidade destes algoritmos é definida então pelo número de execuções de alocação

de blocos em função do número de usuários K e quantidade de blocos N , ou seja, a complexidade é $\leq O(N \times K)$.

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

Usuários	10	20	30	40
QoS <i>guaranteed</i>	0.144	0.181	0.279	0.409
PSO	14.025	15.388	16.510	17.651
Proposto	1.142	2.241	3.295	3.972
<i>Min-delay</i>	0.150	0.251	0.297	0.465

O índice de justiça (*fairness*) é uma importante medida para determinar se os usuários estão recebendo uma distribuição justa dos recursos do sistema. A Figura 5 mostra que o algoritmo proposto apresenta valores de *fairness* maiores do que os apresentados pelo algoritmo PSO e *QoS guaranteed*, e similares aos valores apresentados pelo algoritmo *Min-delay*. O *fairness* foi calculado da seguinte forma [21]:

$$Fairness = \frac{\left[\sum_{k=1}^K x_k \right]^2}{K \sum_{k=1}^K x_k^2}, \quad (13)$$

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.

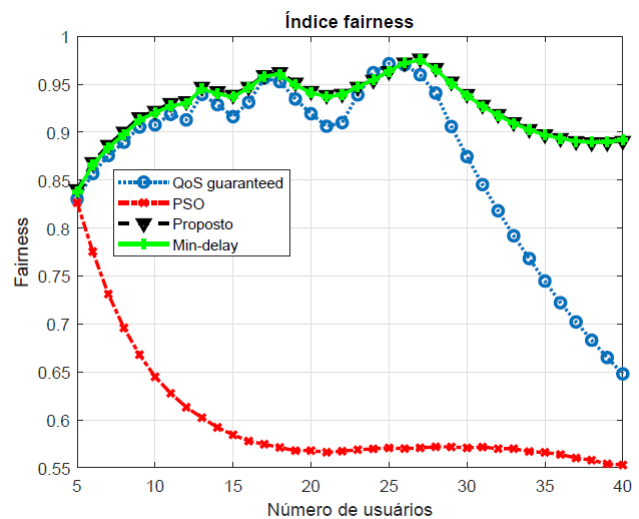


Fig. 5. Índice de justiça (*fairness*) em função do número de usuários.

A Figura 6 mostra que o algoritmo proposto apresenta em geral taxas de perda menores do que as taxas apresentadas pelos demais algoritmos, se considerado mais de 15 usuários em simulação.

VII. CONCLUSÃO

Neste artigo propomos um algoritmo de alocação de blocos de recurso em redes sem fio cujo objetivo é utilizar a informação de retardo estimado por Cálculo de Rede através de conceitos de curva de serviço e processo envelope MFBAP a fim de reduzir o retardo do sistema. Assim, em nossa

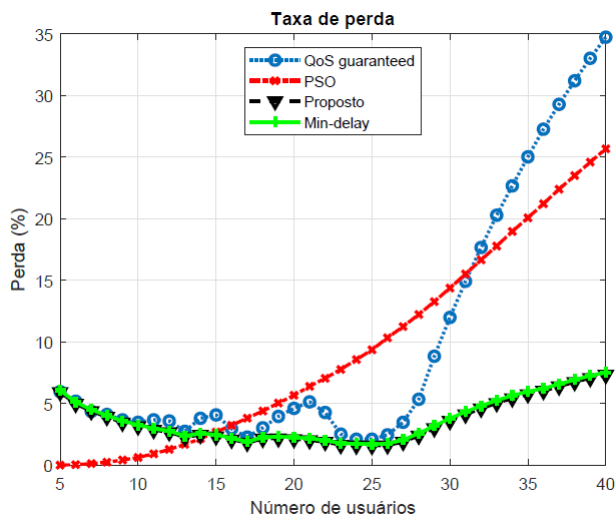


Fig. 6. Taxa de perda em função do número de usuários.

proposta, podemos atualizar a estimativa de retardo a medida que as características dos dados de tráfego no sistema variam e tomar decisões antecipadas sobre a alocação de recursos.

Os resultados das simulações mostram que o desempenho do algoritmo proposto é em geral superior ou similar ao desempenho dos algoritmos *QoS guaranteed* [5], PSO [4] e *Min-delay* [6], principalmente se considerado mais de 15 usuários em simulação.

Em termos de vazão, o algoritmo proposto provê os maiores valores se considerado mais de 14 usuários em simulação. Em relação ao retardo médio, o algoritmo proposto apresenta os menores valores em geral. Nota-se também que o algoritmo apresenta baixo tempo computacional, valores de *fairness* acima de 0,8, maiores do que os apresentados pelos demais algoritmos, e apresenta baixa taxa de perda.

Como proposta para pesquisa futura, pretendemos calcular uma curva de serviço específica para o escalonador proposto de forma a melhorar a estimativa de limitante de retardo e também ampliar o cenário de simulação para um cenário 5G com comunicação D2D (*Device-to-Device*, Dispositivo a Dispositivo).

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer à FAPEG (Fundação de Amparo à Pesquisa no Estado de Goiás) pelo apoio no desenvolvimento da pesquisa.

REFERÊNCIAS

- [1] M. Bi, W. Jia, L. Li, X. Miao, and W. Hu, "Investigation of f-ofdm in 5g fronthaul networks for seamless carrier-aggregation and asynchronous transmission," in *2017 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC)*, March 2017, pp. 1–3.
- [2] D. Wu, X. Zhang, J. Qiu, L. Gu, Y. Saito, A. Benjebbour, and Y. Kishiyama, "A field trial of f-ofdm toward 5g," in *2016 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*, Dec 2016, pp. 1–6.
- [3] J. Abdoli, M. Jia, and J. Ma, "Filtered ofdm: A new waveform for future wireless systems," in *2015 IEEE 16th International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC)*, June 2015, pp. 66–70.

- [4] L. Su, P. Wang, and F. Liu, "Particle swarm optimization based resource block allocation algorithm for downlink lte systems," in *2012 18th Asia-Pacific Conference on Communications (APCC)*, Oct 2012, pp. 970–974.
- [5] N. Guan, Y. Zhou, L. Tian, G. Sun, and J. Shi, "Qos guaranteed resource block allocation algorithm for lte systems," in *2011 IEEE 7th International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob)*, Oct 2011, pp. 307–312.
- [6] M. V. G. Ferreira, F. H. T. Vieira, and D. C. Abrahão, "Minimizing delay in resource block allocation algorithm of lte downlink," in *2015 International Workshop on Telecommunications (IWT)*, June 2015, pp. 1–7.
- [7] O. Delgado and B. Jaumard, "Scheduling and resource allocation in lte uplink with a delay requirement," in *2010 8th Annual Communication Networks and Services Research Conference*, May 2010, pp. 268–275.
- [8] J. Santos Jr and F. H. Vieira, "Estimation of backlog and delay in ofdm/tdma systems with traffic policing through network calculus," *Latin America Transactions, IEEE (Revista IEEE America Latina)*, vol. 13, pp. 796–803, 03 2015.
- [9] J.-Y. Le Boudec and P. Thiran, "Network calculus: A theory of deterministic queuing systems for the internet," vol. 2050, 06 2004.
- [10] M. P. V. Gadre, and U. Desai, *Multifractal Based Network Traffic Modeling*. Springer US, 2003. [Online]. Available: <https://books.google.com.br/books?id=il50A6IT5POC>
- [11] "Análise de desempenho de sistemas de comunicação ofdm-tdma utilizando cadeias de markov e curva de serviço," Master's thesis, 2013, escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação - EMC (RG). [Online]. Available: <http://repositorio.bc.ufg.br/tede/handle/tede/3795>
- [12] 3GPP, "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.
- [13] —, "3gpp ts 36.213 version 13.0.0 release 13. lte; evolved universal terrestrial radio access (e-utra); physical layer procedures," 2016.
- [14] X. Zhang, M. Jia, L. Chen, J. Ma, and J. Qiu, "Filtered-ofdm - enabler for flexible waveform in the 5th generation cellular networks," in *2015 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, Dec 2015, pp. 1–6.
- [15] G. Fettweis, M. Krondorf, and S. Bittner, "Gfdm - generalized frequency division multiplexing," in *VTC Spring 2009 - IEEE 69th Vehicular Technology Conference*, April 2009, pp. 1–4.
- [16] F. Schaich, "Filterbank based multi carrier transmission (fbmc) - evolving ofdm: Fbmc in the context of wimax," in *2010 European Wireless Conference (EW)*, April 2010, pp. 1051–1058.
- [17] F. Schaich and T. Wild, "Waveform contenders for 5g - ofdm vs. fbmc vs. ufmc," in *2014 6th International Symposium on Communications, Control and Signal Processing (ISCCSP)*, May 2014, pp. 457–460.
- [18] M. Ni, X. Xu, and R. Mathar, "A channel feedback model with robust sinr prediction for lte systems," in *2013 7th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, April 2013, pp. 1866–1870.
- [19] M. Kawser, N. Intiaz Bin Hamid, M. Nayeemul Hasan, M. Shah Alam, and M. Musfiqur Rahman, "Downlink snr to cqi mapping for different multiple antenna techniques in lte," vol. 2, pp. 756–760, 09 2012.
- [20] 3GPP, "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.
- [21] R. Jain, D.-M. Chiu, and W. Hawe, "A quantitative measure of fairness and discrimination for resource allocation in shared computer systems," *CoRR*, vol. cs.NI/9809099, 1998. [Online]. Available: <http://dblp.uni-trier.de/journals/corr/corr9809.html#cs-NI-9809099>



Marcus Vinicius Gonzaga Ferreira received his B.Sc. degree in Computer Engineering from the Federal University of Goiás (UFG) in 2010, the postgraduate degree in Technologies for Business Management from the Federal University of Goiás (UFG) in 2012 and the M.Sc. degree in Electrical and Computer Engineering from the Federal University of Goiás (UFG) in 2015. He is currently a doctorate student in Computer Science from the Federal University of Goiás and IT Infrastructure Analyst at the Goiás State Court of Justice since 2008. He acts in the following research areas: Network Traffic Modeling and Control, Communication Networks, Computational Intelligence and Optimization Algorithms Applied to Communication.



Flávio Henrique Teles Vieira received his B.Sc. degree in Electrical Engineering from the Federal University of Goiás (UFG) in 2000, the M.Sc. degree in Electrical and Computer Engineering from UFG in 2002 and the doctorate degree in Electrical Engineering at State University of Campinas (FEEC-UNICAMP) in 2006. He is currently Professor of the Electrical, Mechanical and Computer (EMC) School of Engineering of Federal University of Goiás (UFG).

He acts in the following research areas: Network Traffic Modeling and Control, Communication Networks, Computational Intelligence and Optimization Algorithms Applied to Communication and Power Systems.