

Alocação Dinâmica de *Slots* de Tempo Multiusuário para Redes OFDM/TDMA baseada em Banda Efetiva e Modelagem β MWM

Bruno Henrique Pereira Gonçalves, Flávio Henrique Teles Vieira e Victor Hugo Teles Costa

Resumo—Neste trabalho propomos um esquema de alocação adaptativa de *slots* de tempo para cada usuário em um sistema OFDM/TDMA utilizando a teoria de Banda Efetiva. Para tal, propomos um algoritmo para estimação adaptativa dos parâmetros do modelo de tráfego *Multifractal Wavelet Model* (MWM) com a finalidade de calcular a Banda Efetiva para os fluxos de tráfego de entrada no sistema. Validamos o desempenho do esquema de alocação adaptativa proposto através de simulações com séries de tráfegos reais.

Palavras-Chave—OFDM/TDMA, Banda Efetiva, Multifractal, *Multifractal Wavelet Model*

Abstract—In this paper we propose an adaptive allocation scheme which determines the number of time slots for each user in an OFDM/TDMA system through the Effective Bandwidth theory. For that purpose, we developed an algorithm to adaptively estimate the parameters of the MWM (*Multifractal Wavelet Model*) traffic model that allow us to calculate the effective bandwidth for the incoming traffic flows. We evaluate the performance of the proposed adaptive allocation scheme through simulations using real traffic traces.

Keywords—OFDM/TDMA, Effective Bandwidth, Multifractal, *Multifractal Wavelet Model*

I. INTRODUÇÃO

Com o crescimento do acesso à Internet através de redes sem fio, tecnologias de alta velocidade de transmissão de dados multiusuário se tornam cada dia mais necessárias. Uma tecnologia de sucesso utilizada por vários tipos de redes sem fio é o OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) [1].

A técnica de multiplexação OFDM é uma tecnologia de transmissão de rádio de alta velocidade utilizada em vários sistemas de rede sem fio, como Wi-Fi (padrão IEEE 802.11 [2]), WiMAX (padrão IEEE 802.16 [3]) e LTE [4]. A transferência de dados é feita através de várias subportadoras simultaneamente [5].

No sistema OFDM/TDMA, a tecnologia OFDM proporciona transferência de dados em alta velocidade e a tecnologia TDMA (*Time Division Multiple Access*) proporciona acesso multiusuário ao sistema [6]. O TDMA provê acesso multiusuário através da divisão no tempo. Neste artigo, mostramos que alocar intervalos de tempo proporcionais às taxas de dados dos fluxos de tráfegos dos usuários pode melhorar o desempenho e diminuir perdas do sistema.

Bruno Henrique Pereira Gonçalves, Flávio Henrique Teles Vieira e Victor Hugo Teles Costa, Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação, Universidade Federal de Goiás (UFG) - Goiânia, GO - Brasil. E-mails: brunohpg@gmail.com, flavio@eee.ufg.br, victor@vcosta.com.br.

Este trabalho apresenta uma proposta para alocação de *slots* de tempo em redes OFDM/TDMA com a finalidade de melhorar alguns parâmetros de desempenho do sistema como a perda de dados total do sistema e a perda média por usuário.

O trabalho está organizado da seguinte forma: na seção II propomos um algoritmo para estimação adaptativa dos parâmetros do modelo multifractal β MWM; na seção III apresentamos a teoria de banda efetiva e relacionamos com o modelo proposto; na seção IV apresentamos o sistema OFDM/TDMA; na seção V propomos um esquema de alocação dinâmica do tempo de usuário em um sistema OFDM/TDMA; na seção VI validamos o método proposto; na seção VII concluímos.

II. MODELAGEM MULTIFRACTAL β MWM ADAPTATIVA

O *Multifractal Wavelet Model* (MWM) é um modelo multifractal com grande destaque na modelagem de tráfego de redes [7] [8]. Ele é baseado em uma cascata multiplicativa no domínio *wavelet*. A transformada *wavelet* [9] [10] discreta é usada neste modelo devido a sua capacidade de representação multiescala de sinais. O MWM apresenta mais de uma modelagem para os coeficientes *wavelet* e coeficientes de escala, gerados pela transformada *wavelet*. Uma dessas modelagens é o β MWM.

O processo de modelagem do β MWM realiza a transformada discreta de *wavelet* de Haar para um número fixo de camadas, J , da cascata multiplicativa binomial [11] para a série completa em uma única etapa. A partir dos coeficientes *wavelet* ($W_{j,i}$) e coeficientes de escala ($U_{j,i}$) gerados, por camada $j \quad \forall \quad 0 \leq j \leq J - 1$, os parâmetros MWM são estimados, conforme mostrado mais à frente.

Uma vez estimados os coeficientes de escala $U_{j,i}$, o β MWM assume que os coeficientes de escala da primeira camada ($j = 0$) são independentes e identicamente distribuídos (i.i.d.) e, utilizando o teorema do limite central, possuem uma distribuição normal. Os parâmetros média μ_c e variância σ_c^2 dos coeficientes de escala da primeira camada - agora chamados de $U_{0,0}$ - são estimados para o modelo. Os outros coeficientes de escala podem ser estimados através dos coeficientes *wavelet* e dos coeficientes de escala da primeira camada.

Os multiplicadores da cascata multiplicativa são modelados, por camada j , segundo uma distribuição Beta simétrica [12]. A distribuição de probabilidade Beta possui dois parâmetros. Quando ambos os parâmetros possuem o mesmo valor, chamamos essa distribuição de Beta simétrica, pois ela passa a

possuir a propriedade de ser simetricamente distribuída entre $[-1, 1]$ e média igual a 0¹.

A função densidade de probabilidade da distribuição Beta simétrica é dada por [12]:

$$f(x) = \frac{(1+x)^{p-1}(1-x)^{p-1}}{\text{Beta}(p, p)2^{2p-1}} \quad (1)$$

onde $\text{Beta}(x, y) = \int_0^1 t^{x-1}(1-t)^{y-1} dt$ é a função beta e p é o parâmetro que determina a forma da distribuição.

O β MWM relaciona o decaimento de energia dos coeficientes *wavelet* n_j por camada j com os valores dos parâmetros p_j das distribuições beta simétrico, utilizadas para modelar os multiplicadores da cascata. O decaimento de energia dos coeficientes *wavelet* é dado por [7]:

$$n_j = \frac{E[W_{j-1,k}^2]}{E[W_{j,k}^2]} \quad (2)$$

e os parâmetros p_j são estimados, recursivamente, por:

$$p_j = \frac{n_j}{2} (p_{j-1} + 1) - \frac{1}{2} \quad (3)$$

Propomos um algoritmo para estimar os parâmetros do β MWM adaptativamente. Ao invés do processamento de todos os dados da série de tráfego em uma única etapa, propomos o processamento iterativo em janelas de tamanho fixo de 2^J amostras, onde J é o número de camadas da cascata. Apenas algumas variáveis são armazenadas no processo de modelagem, não havendo a necessidade de guardar uma grande quantidade de dados sobre o fluxo.

A modelagem proposta apresenta os seguintes passos:

Algoritmo 1: Algoritmo para Estimação Adaptativa dos Parâmetros do β MWM

- 1° As variáveis do modelo são inicializadas. Fazemos o segundo momento dos coeficientes *wavelet*, $E[W_{j,k}^2](0) = 0$; média e variância dos coeficientes de escala $\mu_c(0) = 0$ e $\sigma_c^2(0) = 0$; contador de janela $n = 0$.
- 2° Realiza-se a transformada de Haar na janela não sobreposta de dados de 2^J amostras. A transformada de Haar em cada janela de 2^J amostras gera 2^j coeficientes *wavelet* - nomeados de $\tilde{W}_{j,k}$ - por camada j e um coeficiente de escala - nomeado de $\tilde{U}_{0,0}$ - na camada $j = 0$;
- 3° Atualiza-se o segundo momento $E[W_{j,k}^2]$ dos coeficientes *wavelet* através da equação:

$$E[W_{j,k}^2](n+1) = E[W_{j,k}^2](n) \left(\frac{n}{n+1} \right) + \frac{\sum_{i=0}^{2^j-1} \tilde{W}_{j,i}^2}{(n+1)2^j} \quad (4)$$

- 4° As taxas de energia n_j são recalculadas segundo a equação (2) e os parâmetros p_j são recalculados segundo a equação (3).

¹Há variações dessa distribuição onde a média é 1/2 e possui algumas propriedades diferenciadas. Adotaremos neste trabalho a distribuição Beta com função densidade de probabilidade dada pela equação 1.

- 5° As estatísticas dos coeficientes de escala são atualizados segundo as equações:

$$\mu_c(n+1) = \mu_c(n) \left(\frac{n}{n+1} \right) + \frac{\tilde{U}_{0,0}}{n+1} \quad (5)$$

$$\sigma_c^2(n+1) = (\sigma_c^2(n) + (\mu_c(n))^2) \left(\frac{n}{n+1} \right) - (\mu_c(n+1))^2 + \frac{(\tilde{U}_{0,0})^2}{n+1} \quad (6)$$

Os passos 2, 3, 4 e 5 são repetidos a cada nova janela de dados de 2^J amostras, incrementando o valor da variável n em 1. Assim, com o algoritmo adaptativo proposto obtém-se os parâmetros do modelo β MWM que são: p_j , μ_c e σ_c^2 .

O processo estocástico a partir do modelo β MWM, na camada n , é dado por [7]:

$$C^n[k] = 2^{-n} U_{0,0} \prod_{j=0}^{n-1} (1 + \beta(p_j, p_j)) \quad (7)$$

$$C^n[k] = 2^{-n} \text{Norm}(\mu_c, \sigma_c^2) \prod_{j=0}^{n-1} (1 + \beta(p_j, p_j)) \quad (8)$$

onde $\beta(\cdot, \cdot)$ é uma variável aleatória beta com p.d.f. dada pela equação (1) e $\text{Norm}(\mu, \sigma^2)$ é uma variável aleatória normal com média μ e variância σ^2 .

III. BANDA EFETIVA UTILIZANDO MODELAGEM β MWM ADAPTATIVA

A banda, no contexto de redes, quantifica a taxa na qual o enlace de rede ou caminho de rede pode transferir dados. A banda efetiva representa a banda necessária para atender requisitos de QoS (Qualidade de Serviço) exigidos para um fluxo, como probabilidade de perda em uma conexão dado um certo tamanho de *buffer*.

Seja $X[0, t]$ o tráfego acumulado durante o intervalo de tempo $[0, t]$ para um fluxo de tráfego e que $X[0, t]$ tenha incrementos estacionários, ou seja, $X[0, t + \tau] - X[0, \tau] \stackrel{d}{=} X[0, t] - X[0, 0]$ ($\stackrel{d}{=}$ representa igualdade de distribuição). A banda efetiva do fluxo de tráfego é definida por Kelly [13] pela equação:

$$\alpha(s, t) = \frac{1}{st} \ln(E[e^{sX[0,t]}]) \quad s > 0, t < \infty \quad (9)$$

Segundo essa definição, a banda efetiva de um processo depende de um parâmetro de espaço s e de um parâmetro de tempo t . Os parâmetros s e t determinam os requisitos de QoS exigidos para o fluxo. A escolha dos parâmetros depende, além dos requisitos de QoS, das características do tráfego.

A banda efetiva tem como limite inferior a taxa média ($s \rightarrow 0$) e limite superior a taxa de pico ($s \rightarrow \infty$) do fluxo de tráfego. Quando fluxos de tráfego são simultaneamente servidos a taxas equivalentes as suas bandas efetivas, requisitos de QoS são atendidos para estes fluxos [14].

Quando há apenas uma fonte e a capacidade C da rede for igual a banda efetiva da fonte, podemos aproximar a probabilidade de transbordo por [15]:

$$\log P(Q_N > B) \approx -Bs \quad (10)$$

$$P(Q_N > B) \approx \exp(-Bs) \quad (11)$$

onde B é o tamanho do *buffer*.

A partir das equações (9) e (8) a banda efetiva para o modelo β MWM pode ser escrita na forma:

$$\alpha(s, 2^n) = \frac{1}{st} \ln \left(E \left[e^{\left[2^{-J+2n} U_{0,0} \prod_{j=0}^{J-1-n} (1+\beta(p_j, p_j)) \right]} \right] \right) \quad (12)$$

Como a cascata multiplicativa do MWM é diádica, o valor de t deve ser diático, ou seja, $t = 2^n$, $0 \leq n \leq J - 1$.

IV. SISTEMA OFDM/TDMA

No sistema OFDM considerado, assumimos que o transmissor possui informação da razão sinal-ruído (SNR, do inglês, *signal-to-noise ratio*), que representa a qualidade do canal de comunicação sem fio. Utilizando modulação e codificação adaptativas (*adaptive modulation and coding*, AMC), o número máximo de bits por símbolo amostrado (por Hz) que o usuário n pode transmitir na subportadora m no instante de tempo t , denotado por $c_{m,n}(t)$, pode ser escrito em função da SNR e da probabilidade de erro de bit (Bit Error Rate, BER) P_{ber} . Há várias aproximações desta equação, mas todas elas são limitadas superiormente pela seguinte expressão do nível de modulação [5]:

$$c_{m,n}(t) = \left\lfloor \log_2 \left(1 + \frac{-1,5}{\ln(5P_{ber})} \gamma_{m,n}(t) \right) \right\rfloor \quad (13)$$

onde $\gamma_{m,n}(t)$ é a SNR da subportadora m para o usuário n no instante de tempo t .

A transmissão OFDM/TDMA provê acesso multiusuário a uma rede OFDM. Os usuários são servidos por divisão no tempo. Apenas um usuário utiliza o canal OFDM em um determinado instante de tempo. Os usuários são escalonados e cada usuário pode transmitir dados por um período de tempo. Um pequeno tempo ocioso é inserido na transição de um usuário à outro para evitar interferência. Uma técnica comum de escalonamento é o *round-robin* [5], na qual os usuários são escalonados em sequência e cada um pode transmitir por um determinado período de tempo.

V. ESQUEMA PROPOSTO DE ALOCAÇÃO DINÂMICA DE Slots DE TEMPO

Seja N o número de usuários; M o número subportadoras OFDM; Δt o tempo mínimo alocado para um usuário, também chamado de “tempo de um *slot*”; $S_n(i)$ o número de *slots* de tempo que o usuário n tem para transferir dados no ciclo i ; $T_n(i) = S_n(i)\Delta t$ o tempo que o usuário n tem para transferir dados no ciclo i ; $S_{ciclo}(i) = \sum_{n=1}^N S_n(i)$ o número total de *slots* alocados no ciclo i ; T_{inter} o tempo sem transmissão entre usuários para evitar interferência intersimbólica; $T_{ciclo}(i)$ o tempo total do ciclo i , ou seja, $T_{ciclo}(i) = NT_{inter} + \sum_{n=1}^N T_n(i)$.

Propomos um esquema de alocação onde o tempo de transmissão de um usuário é múltiplo de um valor de tempo infinitesimal $\Delta t \rightarrow 0$. A taxa de transmissão de um usuário n no ciclo i , $C_n(i)$, pode ser dada por:

$$C_n(i) = \frac{S_n(i)H_n(i)}{T_{ciclo}} = \frac{T_n(i)H_n(i)}{\Delta t T_{ciclo}(i)} \quad (14)$$

onde $H_n(i)$ é a quantidade de dados que pode ser transferida pelo usuário n no intervalo de tempo Δt no ciclo i .

A banda efetiva representa a taxa mínima necessária para atender determinados requisitos de QoS. Idealmente, todos usuários de um sistema TDMA deveriam ter capacidade igual ou superior a sua banda efetiva para que os requisitos de QoS sejam atendidos. Porém, em um sistema TDMA com capacidade limitada nem sempre é possível atender a capacidade exigida para todos os usuários. Assim, o esquema de alocação proposto, que é baseado em TDMA, aloca o tempo de cada usuário proporcional à sua banda efetiva.

Seja f_p um fator de proporcionalidade igual para todos usuários e $B_n(i)$ a banda efetiva para atender um certo requisito de probabilidade de transbordo do *buffer* do usuário n no ciclo i . Para cada usuário n , propomos que o sistema atenda o seguinte valor de banda:

$$f_p B_n(i) = C_n(i) \quad \forall 1 \leq n \leq N \quad (15)$$

Substituindo a equação (14) na equação (15), tem-se:

$$f_p B_n(i) = \frac{S_n(i)H_n(i)}{T_{ciclo}(i)} \quad \forall 1 \leq n \leq N \quad (16)$$

Assim, o número de *slots* por usuário por ciclo é dado por:

$$S_n(i) = f_p T_{ciclo}(i) \frac{B_n(i)}{H_n(i)} \quad \forall 1 \leq n \leq N \quad (17)$$

Considerando que f_p e $S_n \forall 1 \leq n \leq N$ podem assumir valores arbitrários, esse sistema possui múltiplas soluções. Fixando o tempo do ciclo T_{ciclo} (equivalente a fixar o número de *slots* por ciclo S_{ciclo}), o sistema passa a ter uma única solução: a quantidade de *slots* de tempo de cada usuário é proporcional a razão entre sua banda efetiva e sua capacidade.

$$S_n(i) \propto \frac{B_n(i)}{H_n(i)} \quad \forall 1 \leq n \leq N \quad (18)$$

E o número de *slots* de cada usuário pode ser determinado por:

$$S_n(i) = \text{round} \left[S_{ciclo} \frac{\frac{B_n(i)}{H_n(i)}}{\sum_{k=1}^N \frac{B_k(i)}{H_k(i)}} \right] \quad (19)$$

onde “round” é a função de arredondamento para o inteiro mais próximo.

Em um ambiente real, a alocação de *slots* de tempo proposta é feita de forma aproximada, uma vez que $\Delta t \rightarrow 0$ não é praticável, pois a alocação é feita por pacotes na prática e não por bits de dados.

A alocação de tempo por usuário pode ser realizada de forma adaptativa utilizando a modelagem β MWM Adaptativa

proposta e calculando a respectiva banda efetiva adaptativamente a partir do modelo obtido. Os requisitos de QoS determinados no cálculo da banda efetiva nem sempre serão atendidos, dado que nem sempre a capacidade será igual a banda efetiva. Neste caso, $f_p < 1$. Porém, se o sistema conseguir atender todo o tráfego dos usuários, $f_p \geq 1$, os requisitos de QoS poderão ser atendidos ($f_p = 1$) e possivelmente superados ($f_p > 1$).

VI. RESULTADOS

Com a finalidade de avaliar o esquema de alocação de *slots* proposto, simulamos um sistema OFDM/TDMA com 4 usuários ($N = 4$) e séries de tráfego TCP/IP reais - dec-pkt-1, dec-pkt-2, lbl-pkt-4 e dec-pkt-4² representando os usuários 1, 2, 3 e 4 respectivamente -, empregando a alocação dinâmica de tempo. Simulamos o sistema com tempo fixo para cada usuário. As séries de tráfego consideradas representam os dados a serem transmitidos pelos usuários. Nas simulações, foi considerado a política de escalonamento *round-robin* [5]. Os usuários podem transferir dados através de $M = 256$ subportadoras OFDM com largura de banda de 25kHz por subportadora. Determinamos a taxa de erro de bit, BER, como $P_{ber} = 10^{-6}$. A SNR por subportadora por usuário foi definida como uma variável aleatória normal com média 15dB e variância 5 [16].

Na simulação utilizando o esquema proposto, a banda efetiva foi calculada numericamente a partir do modelo β MWM adaptativo através da equação (12) para última camada do modelo, de forma a atender o requisito de probabilidade de transbordo de 1% com *buffer* de 60kB. Os parâmetros do modelo β MWM foram estimados utilizando-se amostras das séries agregadas em um intervalo de 256 ms. No esquema de alocação de taxa proposto, a quantidade de *slots* foi determinada a cada início do ciclo TDMA.

Como as séries de dados estão na escala de milissegundos, o tempo por usuário foi definido como 1 ms e o tempo entre usuários foi desprezado ($T_{inter} = 0$). O tempo de ciclo foi fixado em 200 ms. Na simulação com tempo fixo, cada usuário possui 50 ms para enviar dados por ciclo.

A Tabela I apresenta os dados de perda do sistema e a média de perda dos usuários, com e sem o esquema proposto. Pode-se observar que o esquema proposto de alocação de *slots* reduz tanto a perda total do sistema quanto a perda média por usuário.

TABELA I

PERDA DO SISTEMA E MÉDIA DE PERDA DOS USUÁRIOS.

	Normal	Proposto
Perda do Sistema	21,55%	9,78%
Média de Perda dos Usuários	14,77%	12,30%

A Tabela II apresenta a média da estimativa do retardo. Como estimativa do retardo, tomamos o valor do tamanho da fila no *buffer* e dividimos pela capacidade do usuário por ciclo. A média da estimativa do retardo aumenta para usuários com

menores taxas de dados - usuários 1 e 3 - e diminui para usuários com maiores taxas de dados - usuários 2 e 4 - com a utilização do esquema de alocação de tempo para os usuários proposto. Isso pode ser explicado pelo fato que o esquema proposto tende a aumentar a capacidade dos usuários com maiores taxas de dados e limitar a capacidade dos usuários com menores taxas de dados.

TABELA II

MÉDIA DA ESTIMATIVA DO RETARDO.

	Normal	Proposto
Usuário 1	188.47 ms	326.09 ms
Usuário 2	245.21 ms	98.97 ms
Usuário 3	84.69 ms	413 ms
Usuário 4	173.34 ms	69.64 ms

A Tabela III apresenta a média da utilização do sistema. A utilização do sistema foi estimada através da equação (20), onde $V(t)$ é a taxa de saída de dados no instante t e $C(t)$ a capacidade alocada ao usuário servido no instante t . Observa-se um aumento da utilização média do sistema com a aplicação do esquema de alocação proposto.

$$u(t) = \frac{V(t)}{C(t)} \quad (20)$$

TABELA III

UTILIZAÇÃO DO SISTEMA.

Alocação de Tempo	Média da Utilização
Fixa	68,89%
Dinâmica (Proposto)	79,23%

A Figura 1 mostra os valores de banda efetiva estimados adaptativamente para cada usuário em função do tempo. A Figura 2 apresenta os tempos alocados pelo esquema proposto para cada usuário do sistema. Note que quanto maior a banda efetiva do fluxo, maior é o tempo alocado que é exigido pelo usuário no esquema proposto.

A Figura 3 apresenta a taxa de transmissão do sistema em função do tempo com alocação dinâmica de tempo para os usuários e com alocação de tempo fixa para os usuários. Através da Figura 3 é possível observar que há um aumento da vazão do sistema.

VII. CONCLUSÕES

Nesse trabalho propomos uma técnica de alocação dinâmica de tempo em redes OFDM/TDMA que melhora alguns parâmetros de desempenho do sistema, como a perda média entre usuários, a perda total no sistema e utilização do enlace. O esquema proposto tende a aumentar o retardo dos usuários com menores taxas de tráfego e aumentar a utilização do enlace do sistema. Para a aplicação em tempo real, também propomos um modelo multifractal adaptativo que consegue descrever várias estatísticas do tráfego [17].

O esquema de alocação de taxa proposto pode ser estendido e aplicado a diferentes sistemas que utilizam OFDM/TDMA e para outros sistemas com compartilhamento de recursos.

²<http://ita.ee.lbl.gov/html/contrib/>

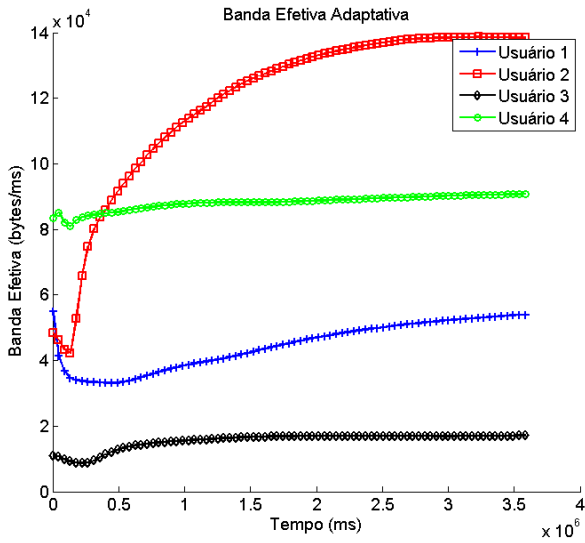


Fig. 1. Banda efetiva adaptativa estimada para os usuários do sistema.

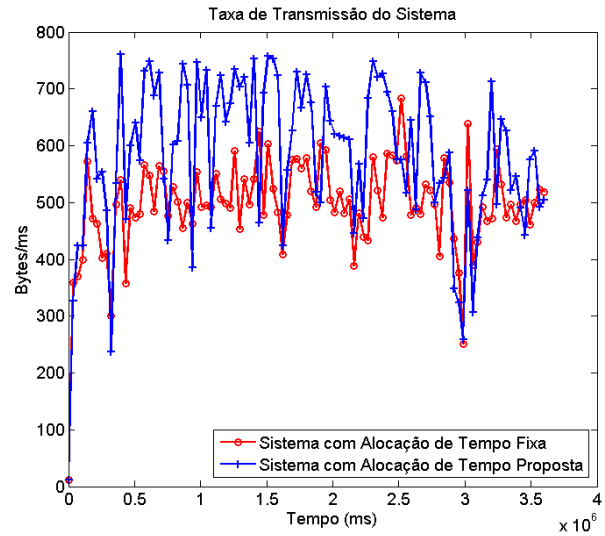


Fig. 3. Taxa de transmissão do sistema.

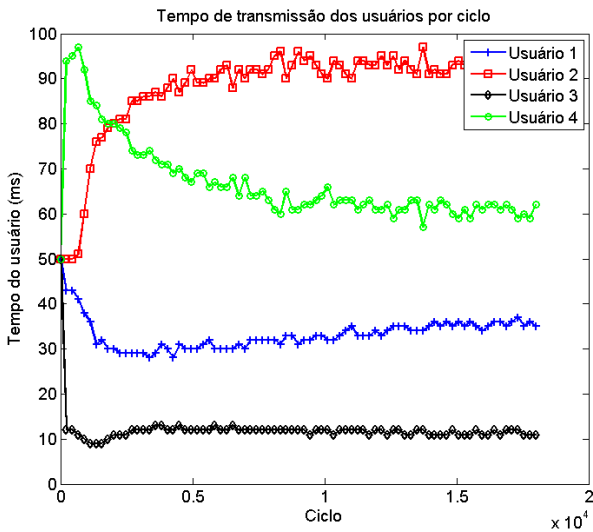


Fig. 2. Tempo alocado a cada usuário utilizando o esquema proposto.

Pretende-se como trabalho futuro, avaliar o desempenho do esquema de alocação proposto em diferentes cenários com modelos de canal e tipos de tráfego diversos. Além disso, objetiva-se aplicar o esquema de alocação proposto em sistemas com características específicas que utilizam OFDM, como por exemplo, LTE (*Long Term Evolution*).

REFERÊNCIAS

[1] Prasad, R. "Ofdm for Wireless Communications Systems. Artech House", (Artech House universal personal communications series). 2004.
 [2] IEEE. Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications. New York, NY, 2012.
 [3] IEEE. IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks - Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems. New York, NY, USA, 2004.
 [4] 3GPP. Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); Overall description. Valbonne, FR, 2013.

[5] Niyato, D.; Hossain, E. "Queueing analysis of ofdm/tdma systems". IEEE Global Telecommunications Conference, vol. 6, p. 5 pp. 3712-3716. December, 2005.
 [6] Tarokh, V. "New Directions in Wireless Communications Research". Springer, 2009.
 [7] Riedi, R. H., Crouse, M. S., Ribeiro, V. J. e Baraniuk, R. G. (1999) "A multifractal wavelet model with application to network traffic". IEEE Trans. on Information Theory, vol. 45, no.3, pp. 992-1018.
 [8] Ribeiro, V. J., Riedi, R. H., Crouse, M. S., Baraniuk, R. G. (2000) "Multiscale queueing analysis of long-range dependent traffic". Proc. IEEE Infocom.
 [9] Vieira, F. H. T., Costa, V. H. T., Gonçalves, B. H. P. (2013) "Neural Network Based Approaches for Network Traffic Prediction". Artificial Intelligence, Evolutionary Computing and Metaheuristics, pp. 657-684
 [10] Chui, C. K. (1992) "An Introduction to Wavelets". San Diego: Academic.
 [11] Rocha, F. G. C. e Vieira, F. H. T. (2009) "Modelagem de tráfego de vídeo MPEG-4 utilizando cascata multifractal com distribuição autorregressiva dos multiplicadores". I2TS, Florianópolis, SC.
 [12] Spiegel, M. R.; Liu, J. (2011) "Manual de Fórmulas e Tabelas Matemáticas". Col. Schaum - 3ª Ed, Makron Books.
 [13] F. Kelly. "Notes on effective bandwidths. In Stochastic Networks", Oxford University Press, 1996
 [14] Duffield, N. G. & O Connell, N. "Large deviations and overflow probabilities for the general single-server queue, with applications". Technical Report 1, Dublin Institute for Advanced Studies-Applied Probability Group, DIAS-STP-93-30. 1993
 [15] Vieira, F. H. T., Bianchi, G. R., Ling, L. L., Lemos, R. P. "Estimação de banda efetiva dinâmica em redes de computadores utilizando uma modelagem auto-regressiva nebulosa". XXI Simpósio Brasileiro de Telecomunicações (SBrt), Belém, Pará. 2004
 [16] Rocha, F. G. C., Vieira, F. H. T., Santos Jr, J.A., "A Multifractal Based Approach for Loss Probability Estimation for OFDM/TDMA Based Systems" In: The 13th 128 International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications, Recife-PE / Brasil, 2010.
 [17] Gonçalves B. H. P., Vieira F. H. T., Costa V. H. T.. "Modelagem Multifractal BetaMWM Adaptativa para Tráfego de Redes de Computadores". X EnAComp, Universidade Federal Goiás, Catalão, Goiás, Brasil (2013)