

# Estimação de Retardo em Redes OFDM-TDMA Utilizando Cálculo de Rede e Modelagem Multifractal no Domínio *Wavelet*

Flávio Geraldo Coelho Rocha, Flávio Henrique Teles Vieira e Álisson Assis Cardoso

**Resumo**— Neste artigo, utiliza-se um modelo multifractal baseado em cascata multiplicativa no domínio *Wavelet* para descrever séries de tráfego reais. Para tanto, inicialmente calcula-se os parâmetros dos multiplicadores da cascata utilizando o decaimento de energia dos coeficientes *Wavelets* e em seguida refina-se os valores obtidos por meio dos momentos dos coeficientes de escala. Além disso, propõe-se uma equação para estimativa do retardo médio de uma rede sem fio baseada na tecnologia OFDM-TDMA, onde a equação proposta é baseada em Cálculo de Rede, no Processo Envelope do modelo de tráfego proposto e em uma Curva de Serviço para o escalonamento de recursos no sistema OFDM-TDMA.

**Palavras-Chave**— Cálculo de Rede, Modelagem do Tráfego de Rede, OFDM-TDMA, Processo Envelope.

**Abstract**— In this paper, in order to describe real wireless network traffic traces we used a multifractal model based on a multiplicative cascade in the Wavelet domain. Therefore, first we calculate the parameters of the cascade multipliers using the energy decay of the Wavelet coefficients and then we refine the obtained values through the moments of the scaling coefficients. Furthermore, we propose an equation to estimate the average delay of a wireless network based on the OFDM-TDMA technology. The proposed equation is based on the Network Calculus, on the Envelope Process of the proposed network traffic model and on a Service Curve for resource scheduling in the OFDM-TDMA system.

**Keywords**— Network Calculus, Network Traffic Modeling, OFDM-TDMA, Envelope Process.

## I. INTRODUÇÃO

O desempenho de redes é alvo de pesquisas constantes, e muitos são os trabalhos propondo modelos para descrição do tráfego de redes [6], [7], [12] e meios de estimação de parâmetros relacionados à Qualidade de Serviço (QoS - *Quality of Service*) [2], [11].

Dentre os modelos de tráfego existentes, modelos monofractais e multifractais têm recebido grande atenção devido aos seus desempenhos em termos de análise do comportamento do tráfego real de redes. Modelos multifractais possuem dependência de longa duração como os modelos monofractais, mas também apresentam diferentes leis de escala, podendo assim capturar as características de pequena escala dos fluxos de tráfego [5], [11]. Para estes modelos, o tratamento analítico é geralmente mais difícil que para os modelos Markovianos e

impõe limitações ao estudo e projeto relacionados ao atendimento a métricas de QoS.

A estimativa de parâmetros de QoS é ainda mais difícil em ambientes multiusuários e de rede sem fio, onde as condições de acesso ao meio são bem específicas e mais suscetíveis às incertezas do que no meio com fio.

Neste trabalho, é proposta uma nova abordagem para modelagem do tráfego de rede utilizando uma cascata multiescala no domínio *Wavelet* onde os parâmetros dos multiplicadores são estimados por meio do decaimento de energia dos coeficientes *Wavelets* e posteriormente ajustados (ajuste fino) utilizando os momentos dos coeficientes de escala. O modelo proposto é utilizado para gerar séries sintéticas que correspondem ao tráfego de cada usuário em um ambiente de rede sem fio baseado na tecnologia OFDM-TDMA. Além disso, é proposta uma equação para cálculo do retardo médio da rede utilizando Cálculo de Rede, Processo Envelope e Curva de Serviço. Os resultados obtidos são comparados a outros modelos presentes na literatura.

## II. TRABALHOS RELACIONADOS À MODELAGEM MULTIFRACTAL

Dentre os modelos multifractais existentes na literatura, destaca-se o VVGM [6] (*Variable Variance Gaussian Model*), o VSCM [13] (*Variable Scale parameter Cauchy Multiplier*), e o MWM [11] (*Multifractal Wavelet Model*).

O VVGM, apresentado em [6], baseia-se em uma cascata multiplicativa onde os valores correspondentes aos multiplicadores da cascata são amostras de uma distribuição Gaussiana com média fixa e igual a 1/2. Mais recentemente, os autores em [13] propuseram o VSCM, um modelo multifractal baseado em cascata multiplicativa similar ao VVGM, entretanto, os multiplicadores são modelados por meio de uma distribuição de Cauchy. No entanto, como a média dos multiplicadores não varia com a escala, o desempenho desses modelos pode ficar comprometido quando são consideradas séries de tráfego que apresentam comportamentos distintos em diferentes escalas.

Em outro importante trabalho, Riedi *et al.* propuseram o modelo multifractal MWM (*Multifractal Wavelet Model*) baseado na *Wavelet* de Haar para caracterizar o tráfego de redes [11]. No MWM,  $C(t)$  é um sinal positivo e que pode apresentar longa dependência entre as amostras. Assim, seja  $C^{f_s}[k]$  um sinal discreto no tempo e uma aproximação de  $C(t)$  na resolução de  $2^{-f_s}$ , onde  $f_s$  é a variável relacionada a escala de tempo mais fina (de maior resolução) de uma cascata

Flávio Geraldo Coelho Rocha – Instituto de Informática, Flávio Henrique Teles Vieira e Álisson Assis Cardoso – Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e Computação. Universidade Federal de Goiás, Goiânia-GO, Brasil. E-mails: flavio@inf.ufg.br, flavio@emc.ufg.br, alsnac@gmail.com.

multiplicativa. Utilizando a *Wavelet* de *Haar*, o processo discreto  $C^{f_s}[k]$  pode ser descrito matematicamente por (1):

$$C^{f_s}[k] = \int_{k2^{-f_s}}^{(k+1)2^{-f_s}} C(t)dt = 2^{-f_s/2}U_{f_s,k}. \quad (1)$$

A cascata multiplicativa é formada pelos coeficientes de escala  $U_{j,k}$  e multiplicadores  $A_{j,k}$ , onde  $j$  representa a escala da cascata com valores no intervalo  $[0, f_s]$ , onde  $f_s$  é a escala de maior resolução, e  $k = 0, 1, \dots, 2^{j-1}$  é o índice dos termos em uma mesma escala.

Nesse modelo, pode-se relacionar o deslocamento  $k_j$  de um coeficiente de escala ao deslocamento de um de seus dois descendentes diretos  $k_{j+1}$  por meio de  $k_{j+1} = 2k_j + k'_j$ , onde  $k'_j = 0$  é o descendente levogiro e  $k'_j = 1$  o descendente dextrogiro da cascata. É possível escrever os coeficientes de escala e os coeficientes *Wavelet* do MWM como:

$$U_{j,k_j} = 2^{-j/2}U_{0,0} \prod_{i=0}^{j-1} [1 + (-1)^{k'_i} A_{i,k_i}], \quad (2)$$

$$W_{j,k_j} = 2^{-j/2}A_{j,k_j}U_{0,0} \prod_{i=0}^{j-1} [1 + (-1)^{k'_i} A_{i,k_i}]. \quad (3)$$

No MWM assume-se que, em cada escala  $j$ , os multiplicadores  $A_{j,k}$ , são independentes e identicamente distribuídos (i.i.d) de acordo com alguma variável aleatória simétrica  $A_j \in [-1, 1]$ , onde  $A_j$  representa o vetor de multiplicadores  $A_{j,k}$  na escala  $j$  e para todos os valores de  $k$ . Então, fazendo  $j = f_s$  em (2) e (3), e utilizando (1), tem-se:

$$C^{f_s}[k] \stackrel{d}{=} 2^{-f_s}U_{0,0} \prod_{j=0}^{f_s-1} [1 + A_j]. \quad (4)$$

A equação (4) relaciona, em igualdade de distribuição, o processo de tráfego sintético  $C^{f_s}[k]$  na escala mais fina ao coeficiente de escala na escala mais grosseira (de menor resolução)  $U_{0,0}$  e aos multiplicadores  $A_j$ .

Na seção III, é proposta uma nova abordagem para o MWM, onde os multiplicadores são primeiramente estimados com base no decaimento de energia dos coeficientes *Wavelets*  $W_{j,k}$  e posteriormente refinados utilizando os momentos dos coeficientes de escala  $U_{j,k}$ . Essa abordagem possibilita o cálculo assimétrico dos multiplicadores da cascata, o que é mais compatível com os valores reais dos multiplicadores do que a abordagem simétrica utilizada originalmente no MWM.

### III. AJUSTE FINO DOS PARÂMETROS DOS MULTIPLICADORES DO MWM (*Multifractal Wavelet Model*)

No MWM, os multiplicadores da cascata multiplicativa no domínio *Wavelet* são modelados por meio de uma distribuição beta simétrica com parâmetro  $p_j$ , isto é,  $\beta(p_j, p_j)$ . O parâmetro  $p_j$  é obtido para cada escala  $j$  da cascata por meio do cálculo do decaimento de energia dos coeficientes *Wavelets*  $W_{j,k}$ . Na modelagem de sinais utilizando modelos baseados em *Wavelets*, o controle de energia está relacionado à descrição da estrutura de correlação do sinal que se deseja representar.

Como o tráfego de rede possui características de longa dependência [5], [7], é interessante que essa característica seja capturada ao longo de cada escala.

No MWM, o controle de energia dos coeficientes *Wavelets*  $W_{j,k}$  para cada escala  $j$  é dado pela variável  $n_j$ :

$$n_j = \mathbb{E}[W_{j-1,k}^2] / \mathbb{E}[W_{j,k}^2]. \quad (5)$$

A partir de (5) e utilizando as equações (2) e (3), pode-se mostrar que o parâmetro  $p_j$  da distribuição beta simétrica para cada escala  $j$  pode ser calculado recursivamente:

$$p_j = n_j(p_{j-1} + 1)/2 - 1/2. \quad (6)$$

No entanto, ao modelar o tráfego de rede utilizando séries reais de tráfego pode-se observar que os  $k$  valores dos multiplicadores  $A_{j,k}$  podem ser assimétricos e por isso devem ser melhor modelados por meio de uma distribuição beta genérica  $\beta(a, b)$  no intervalo compacto  $[-1, 1]$ , onde  $a$  pode ser diferente de  $b$ .

Uma forma de estimar os parâmetros  $a$  e  $b$  é calcular  $m_j^q$ : uma forma de controlar os  $q$  momentos dos coeficientes de escala  $U_{j,k}$  a medida que a escala  $j$  varia.

$$m_j^q = \mathbb{E}[U_{j-1,k}^q] / \mathbb{E}[U_{j,k}^q] = 2^{q/2} \mathbb{E}[(1 + A_{j-1,k})^q]^{-1}, \quad (7)$$

onde os coeficientes de escala  $U_{j,k}$  são calculados por meio de:

$$U_{j,k} = 2^{-1/2}(U_{j+1,2k} + U_{j+1,2k+1}). \quad (8)$$

Para  $q = 1$  e  $q = 2$  em (7), tem-se:

$$m_j^1 = 2^{-1/2}(a_j + b_j) / a_j, \quad (9)$$

$$m_j^2 = 2 \left( 1 + 2 \frac{(a_j - b_j)}{(a_j + b_j)} + \frac{(a_j - b_j)^2 + a_j + b_j}{(a_j + b_j)(a_j + b_j + 1)} \right)^{-1}. \quad (10)$$

Uma vez estimados os valores de  $p_j$  utilizando o decaimento de energia dos coeficientes *Wavelets*  $W_{j,k}$  via (5), é possível estimar  $a_j$  e  $b_j$  utilizando os momentos dos coeficientes de escala  $U_{j,k}$  via (9) e (10). Para tanto, pode-se utilizar o algoritmo de Levenberg-Marquardt para os  $q$  momentos de (7), atribuindo  $p_j$  como valor inicial para  $a_j$  e  $b_j$ .

O *Algoritmo 1* apresenta o passo a passo para síntese do tráfego de rede por meio do MWM com ajuste fino dos parâmetros dos multiplicadores  $A_{j,k}$ , conforme a seguir:

**Algoritmo 1:** Síntese de Tráfego utilizando o Modelo MWM com Ajuste Fino dos Parâmetros dos Multiplicadores  $A_{j,k}$

- 1) Calcule a transformada *Wavelet* de *Haar* dos dados que se deseja modelar para obter  $W_{j,k}$  e utilize (1) para obter  $U_{f_s,k}$  na escala de maior resolução  $f_s$ ;
- 2) Utilize (8) para obter  $U_{j,k}$  para cada escala  $j$ ;
- 3) Calcule a média  $\mu_c$  e a variância  $\sigma_c^2$  para os coeficientes de escala  $U_{j,k}$  de menor resolução, isto é  $U_{0,0}$ ;

- 4) Utilize (5) para controlar o decaimento de energia dos coeficientes *Wavelets*  $W_{j,k}$  para cada escala  $j$  e obter  $p_j$ , os parâmetros iniciais dos multiplicadores  $A_{j,k}$ ;
- 5) Utilize (7) para controlar os  $q$  momentos dos coeficientes de escala  $U_{j,k}$  do passo 2 e obter as equações (9) e (10) para ajuste fino dos parâmetros  $p_j$  obtidos no passo 4;
- 6) Utilize os valores de  $p_j$  encontrados no passo 4 como valores iniciais para os parâmetros dos multiplicadores  $A_{j,k}$ , isto é  $a_j^0 = p_j$  e  $b_j^0 = p_j$  e por meio do algoritmo de Levenberg-Marquardt aplicado aos  $q$  momentos do passo 5, itere até obter os valores finais de  $a_j$  e  $b_j$  com tolerância menor ou igual a  $10^{-3}$ ;
- 7) Faça  $j = 0$  e gere valores aleatórios para os coeficientes de escala  $U_{0,0}$  utilizando uma distribuição normal com parâmetros  $\mu_c$  e  $\sigma_c^2$  obtidos no passo 3;
- 8) Para cada escala de tempo  $j$ , gere valores aleatórios para os multiplicadores  $A_{j,k}$  usando os parâmetros  $a_j$  e  $b_j$  encontrados no passo 6;
- 9) Com os parâmetros obtidos nos passos anteriores, utilize (4), substituindo  $A_j$  por  $A_{j,k}$ , para gerar amostras sintéticas por meio do modelo MWM com ajuste fino dos parâmetros dos multiplicadores  $A_{j,k}$ .

Na seção V são apresentados os resultados obtidos por meio de simulações utilizando o *Algoritmo 1* proposto nesta seção.

#### IV. CENÁRIO DE REDE SEM FIO OFDM-TDMA

Nesta seção, a abordagem proposta de modelagem do tráfego de rede é aplicada a um ambiente multiusuário de rede sem fio baseado na tecnologia OFDM-TDMA, onde a capacidade do servidor depende das condições do canal de comunicação. Para tanto, foi utilizado um esquema de transmissão OFDM-TDMA similar àquele encontrado em [10].

Nesse esquema, a largura de banda total para transmissão é  $B$  e cada subportadora possui uma largura de banda  $\Delta f = B/M$  Hz. O número máximo de bits por símbolo (por Hz), denotado por  $c_{m,i}(t)$ , que a subportadora  $m$  para o usuário  $i$  pode transmitir por unidade de tempo  $t$  pode ser expressa em função da SNR e da taxa de erro de bit (BER-*Bit Error Rate*) desejada utilizando modulação e codificação adaptativa.

A estimativa do valor de  $c_{m,i}(t)$  é feita por (11), um limitante superior para a capacidade de transmissão [10]:

$$c_{m,i}(t) = \lfloor \log_2(1 + (-1.5/\ln(5P_{ber}))\gamma_{m,i}(t)) \rfloor \quad (11)$$

onde  $\gamma_{m,i}(t)$  é a SNR instantânea para o tempo  $t$ ,  $m$  é a subportadora relativa ao usuário  $i$  e  $P_{ber}$  é a taxa de erro de bit (BER) desejada.

A Figura 1 esquematiza um cenário multiusuário onde cada usuário  $i$  possui um *buffer*  $b_i$ , taxa de chegada  $\lambda_i$  e taxa de serviço  $c_{m,i}$ . Este artigo propõe uma equação para cálculo do retardo médio experimentado pelos usuários do cenário da Figura 1. Para tanto, primeiro o *Algoritmo 1* é utilizado para calcular o Processo Envelope do tráfego de chegada, posteriormente calcula-se a Curva de Serviço do sistema e em seguida utiliza-se Cálculo de Rede para estimar o processo de *backlog* das filas do sistema e, por fim, aplica-se o teorema de Little para determinar o retardo médio do sistema, conforme detalhado nas subseções seguintes.

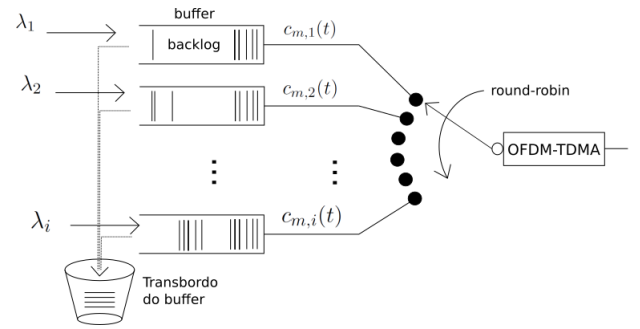


Fig. 1. Cenário multiusuário para o sistema OFDM-TDMA.

#### A. Curva de Serviço

Em um esquema de escalonamento *round-robin*, o escalonador é responsável por gerenciar a transmissão de dados de  $N$  filas e cada uma dessas filas recebe fluxos de tráfego de um usuário  $i$ . Para cada usuário é alocado a quantidade de tempo  $\phi_i$ , que corresponde ao intervalo de tempo que o servidor possui para transmitir dados da fila  $i$  antes do escalonador passar para a fila  $(i + 1) \bmod N$ . O servidor possui taxa de transmissão  $c_i(t)$ , que para o cenário OFDM-TDMA varia em função do tempo  $t$  e do usuário  $i$ .

A taxa de transmissão  $R_i$  que pode ser garantida para o usuário  $i$  pode ser expressa por meio da proporção dos vários fluxos dos usuários, conforme equação (12):

$$R_i(t) = c_i(t) \frac{\phi_i}{\sum_{j=1}^N \phi_j} \quad (12)$$

Assim, a Curva de Serviço que pode ser garantida a um usuário de um sistema com escalonamento *round-robin* é definida da seguinte forma [4]:

*Definição 1:* A Curva de Serviço  $S_i(t)$  para o usuário  $i$  de um sistema com escalonamento *round-robin* e taxa de transmissão  $R_i(t)$  é dada pela equação (13):

$$S_i(t) = R_i(t) \cdot (t - T_1)_+, \quad (13)$$

onde  $R_i(t)$  é dado por (12),  $T_1 = \sum_{i=2}^N \phi_i$  e  $A_+$  é  $\max(A, 0)$ .

#### B. Estimacão do Retardo Médio da Rede

No Cálculo de Rede, a operao de convoluo definida por (14)  conhecida como operao de  $(\min,+)$ , proveniente da lgebra *min-plus* [3], aplicada  processos causais, não-decrescentes e contínuos para  $t > 0$ . Assim, para dois processos  $f(t)$  e  $g(t)$ , defini-se a operao de convoluo [9]:

$$f \otimes g(t) = \inf_{\tau \in [0,t]} \{f(\tau) + g(t - \tau)\} \quad (14)$$

Com base no Cálculo de Rede, a seguinte proposio  enunciada para estimacão do processo de *backlog* nas filas do cenário da Figura 1:

**Proposio 1:** Cálculo de Processo de *backlog*  $B_i(t)$  para o usuário  $i$  no instante de tempo  $t$  baseado na Modelagem

### Multifractal do Algoritmo 1 e em Cálculo de Rede

Seja  $A_i(t)$  o Processo Envelope de tráfego relativo ao usuário  $i$  no instante de tempo  $t$ ,  $c_i$  a capacidade de transmissão alocada ao usuário  $i$  durante o tempo  $\phi_i$  e  $N$  o total de usuários no sistema, então o processo de *backlog* do usuário  $i$  é dado por:

$$B_i(t) \leq \sup_{\tau \in [0, t]} \left\{ A_i(\tau, t) - c_i(t - \tau) \frac{\phi_i}{\sum_{j=1}^N \phi_j} (t - \tau - T_1)_+ \right\}, \quad (15)$$

onde,

$$A(\tau, t) = \sum_{k=0}^t C^{f_s}[k] - \sum_{k=0}^{\tau} C^{f_s}[k]. \quad (16)$$

Prova. Veja o Apêndice I.

Utilizando (15) e o teorema de Little [8], é possível obter o retardo médio ( $d_{médio}$ ) do sistema da Figura 1:

$$d_{médio} = \frac{\sum_{i=1}^N B_i(t)}{\sum_{i=1}^N \lambda_i} \quad (17)$$

Na seção V, são apresentados os resultados das simulações para avaliação da abordagem de modelagem proposta por meio do *Algoritmo 1* e para as estimativas de retardo médio do cenário da Figura 1 obtidas por meio de (17).

## V. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção são apresentados os resultados para uma série de tráfego obtida em 2011 no Departamento de Ciência da Computação da Universidade de Waikato. A série WaikatoVIII-20111027-213205-5, disponível em [1], é chamada neste trabalho apenas de Waikato1. Resultados similares foram obtidos para outras séries reais de tráfego de rede.

Foram encontrados os parâmetros da série real de tráfego utilizando o *Algoritmo 1* e por meio de outros três importantes modelos da literatura, sendo eles o VVGM, o VSCM e o MWM. Os desempenhos dos modelos foram avaliados em termos de estatísticas (média, variância, relação pico/média e parâmetro de *Hurst*), da ACF (*AutoCorrelation Function*) e do processo de tráfego acumulado (Processo Envelope). O EQM (Erro Quadrático Médio) das curvas obtidas foi calculado usando cada modelo de tráfego em relação ao tráfego real. Os resultados do processo de modelagem estão apresentados na Figura 2 e nas Tabelas I e II.

Posteriormente, foram conduzidas simulações utilizando o cenário da Figura 1, onde as características do tráfego de entrada eram dadas pela série de tráfego real Waikato1. Para esse cenário, foi considerada uma largura de banda  $B$  de 5MHz, número de subportadoras  $M$  igual a 256 e taxa de erro de bit (BER) máxima desejada igual a  $10^{-6}$ .

Com o objetivo de obter os resultados de retardo médio para o cenário de rede sem fio operando em diferentes situações, foram conduzidas simulações para quantidades diferentes de usuários na rede e para diferentes valores de SNR, conforme mostrado nas Figuras 3 e 4, respectivamente.

A Tabela I apresenta algumas estatísticas da série de tráfego real e das séries sintéticas que foram geradas a partir do *Algoritmo 1* e dos demais modelos comparados neste artigo. Para média, variância, relação pico/média e parâmetro de *Hurst*, o modelo proposto apresentou menor erro que os demais modelos.

Por meio da Figura 2 é possível observar que a curva do Processo Envelope da abordagem proposta é a que mais se aproxima da curva traçada por meio da série de tráfego real. A Tabela II corrobora com essa afirmação visto que a abordagem proposta é a que possui menor EQM. Resultado similar também foi obtido para a Função de Autocorrelação (ACF).

TABELA I  
ESTATÍSTICAS - SÉRIE WAIKATO1.

Estatística	MÉDIA $\times 10^5$	VAR $\times 10^{10}$	PICO/MÉDIA	HURST
REAL	4.34	2.71	4.8284	0.8977
MWM (E%)	4.34(0.00)	2.50(7.68)	3.5720(26.02)	0.8600(2.61)
VVGM (E%)	4.61(6.16)	3.06(13.28)	3.7758(21.80)	0.9236(2.89)
VSCM (E%)	4.83(11.22)	1.66(38.56)	2.8700(40.56)	0.8411(6.30)
PROP. (E%)	4.34(0.00)	2.80(3.42)	4.3866(9.15)	0.9049(0.80)

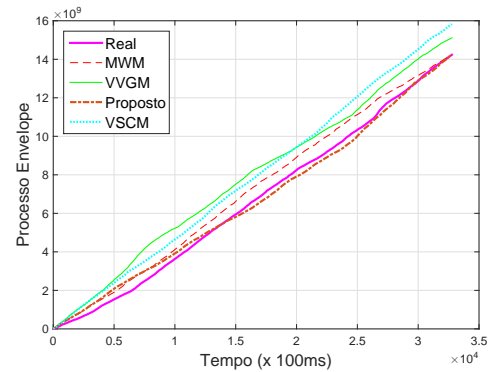


Fig. 2. Processo Envelope para a série de tráfego Waikato1.

TABELA II  
EQM - SÉRIE WAIKATO1.

EQM	ACF	ENVELOPE
MWM	$7.3079 \times 10^{-3}$	$6.8195 \times 10^{-3}$
VVGM	$1.1192 \times 10^{-3}$	$3.0113 \times 10^{-2}$
VSCM	$6.8323 \times 10^{-3}$	$3.0727 \times 10^{-2}$
PROPOSTO	$8.7271 \times 10^{-4}$	$2.1634 \times 10^{-3}$

Na Figura 3 são apresentados os resultados de retardo médio em função do número de usuários. Esses resultados foram obtidos por meio da simulação do cenário OFDM-TDMA da Figura 1 com SNR = 15dB. Já na Figura 4, o número de usuários é fixo e igual a 5 e o retardo médio é apresentado em função da SNR média. Essas Figuras apresentam o retardo médio real, aferido durante a simulação, e os valores de retardo médio estimados por meio de (17), onde o Processo Envelope é dado pelo somatório das amostras de tráfego sintético geradas por meio de cada um dos modelos comparados.

Observa-se, a partir das Figuras 3 e 4, que a abordagem proposta comporta-se como um limitante superior do

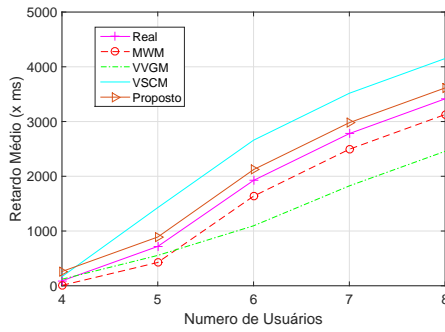


Fig. 3. Retardo em função do número de usuários no sistema OFDM-TDMA.

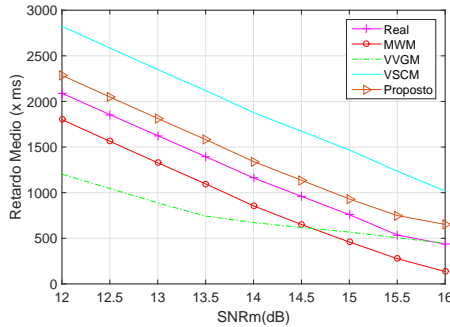


Fig. 4. Retardo em função da SNR média no sistema OFDM-TDMA.

retardo médio real, com estimativas melhores (menores erros quadráticos médios) que àquelas obtidas pelos demais modelos comparados. Assim, a abordagem proposta pode ser utilizada para garantir que uma rede não experimentará retardo superior ao calculado por meio de (17).

## VI. CONCLUSÕES

Neste artigo, foi proposta uma abordagem de modelagem de tráfego baseada no ajuste fino das estimativas dos multiplicadores do MWM. Com essa abordagem, foram obtidos melhores resultados de modelagem e de Processo Envelope do que o MWM e do que outros modelos presentes na literatura.

Além disso, uma equação foi proposta para cálculo do retardo médio de um cenário de rede sem fio baseado na tecnologia OFDM-TDMA, o que proporcionou a obtenção de um limitante superior para o retardo médio da rede mais próximo ao retardo médio real do que àquelas das abordagens comparadas.

## AGRADECIMENTOS

À FAPEG (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Goiás) pelo apoio financeiro recebido (2014.102.67000400).

## APÊNDICE I

### PROVA DA PROPOSIÇÃO 1

*Demonstração:* Seja  $A(t)$  o processo de tráfego acumulado que chega ao sistema no intervalo de tempo  $[0, t)$  e  $D(t)$  o processo de saída também no intervalo  $[0, t)$ . Quando  $A(t) > D(t)$ , diz-se que a fila no buffer  $b$  não estará vazia e o tamanho dessa fila, também chamado de *backlog*, será  $B(t)$ :

$$B(t) = A(t) - D(t) \quad (18)$$

Do cálculo de rede, tem-se que o processo  $D(t)$  pode ser escrito em função de  $A(t)$  e  $S(t)$  por meio de:

$$D(t) \geq A(t) \otimes S(t). \quad (19)$$

Usando (14) é possível reescrever (19) como:

$$D(t) \geq \inf_{\tau \in [0, t]} \{A(\tau) + S(t - \tau)\}. \quad (20)$$

Substituindo (20) em (18), pode-se escrever:

$$B(t) \leq \sup_{\tau \in [0, t]} \{A(\tau, t) - S(t - \tau)\}. \quad (21)$$

onde  $A(\tau - t) = A(t) - A(\tau)$ .

A partir de (4), o Processo Envelope  $A(k)$  para o instante de tempo  $t = k$  pode ser escrito como:

$$A(k) = \sum_{k=0}^{2^{f_s}-1} C^{(f_s)}[k]. \quad (22)$$

Substituindo (22) e (13) em (21), obtêm-se a equação para o processo de *backlog* para o instante de tempo  $t$ , o que pode ser generalizado para qualquer usuário  $i$  da Figura 1, isto é:

$$B_i(t) \leq \sup_{\tau \in [0, t]} \left\{ A(\tau, t) - c_i(t - \tau) \frac{\phi_i}{\sum_{j=1}^N \phi_j} (t - \tau - T_1)_+ \right\}$$

## REFERÊNCIAS

- [1] Waikato university - computer science department - wand network research group. <http://wand.net.nz/wits/waikato/8/>. Accessed: 01-01-2016.
- [2] K. Angrishi. An end-to-end stochastic network calculus with effective bandwidth and effective capacity. *Computer Networks*, 57(1):78 – 84, 2013.
- [3] F. Baccelli, G. Cohen, G. J. Olsder, and J.-P. Quadrat. *Synchronization and linearity: an algebra for discrete event systems*. John Wiley & Sons Ltd, 1992.
- [4] D. Bruneo and S. Distefano. *Quantitative Assessments of Distributed Systems: Methodologies and Techniques*. John Wiley & Sons, 2015.
- [5] A. Feldmann, A. C. Gilbert, and W. Willinger. Data networks as cascades: Investigating the multifractal nature of internet wan traffic. pages 42–55, 1998.
- [6] M. Krishna, V. Gadre, and U. B. Desai. *Multifractal Based Network Traffic Modeling*. Springer US, 2003.
- [7] I. W. Lee and A. O. Fapojuwo. Stochastic processes for computer network traffic modeling. *Computer Communications*, 29(1):1 – 23, 2005.
- [8] J. D. Little. A proof for the queuing formula:  $L = \lambda w$ . *Operations research*, 9(3):383–387, 1961.
- [9] S. Mao and S. Panwar. A survey of envelope processes and their applications in quality of service provisioning. *Communications Surveys & Tutorials, IEEE*, 8(3):2–20, 2006.
- [10] E. Niyato, D.; Hossain. Queuing analysis of ofdm/tdma systems. In *GLOBECOM '05. IEEE*, pages 3712 – 3716, 2005.
- [11] R. H. Riedi, M. S. Crouse, V. J. Ribeiro, and R. G. Baraniuk. A multifractal wavelet model with application to network traffic. *IEEE Transactions on Information Theory*, 45:992–1018, 1998.
- [12] F. G. C. Rocha and F. H. T. Vieira. Modeling of mpeg-4 video traffic using a multifractal cascade with autoregressive multipliers. *IEEE Latin America Transactions*, 9(5):860 – 867, 2011.
- [13] L. W. Zhijiang Xu and K. Wang. A new multifractal model based on multiplicative cascade. *Information Technology Journal*, 10:452–456, 2011.