LI Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional
Limeira–SP, 02 a 06 de setembro de 2019

Modelagem Multifractal para o Tráfego de Dados com Aplicação em um Cenário Simplificado de Rede 5G

Maykon R. P. da Silva, Flávio G. C. Rocha, Ricardo B. O. de Oliveira
Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação, Universidade Federal de Goiás (UFG)
74.605-010 - Goiânia, GO - Brasil
{maykoon.renan, ricfire.ricardo}@gmail.com, flaviogcr@ufg.br

RESUMO

Neste trabalho, a fim de modelar os processos de tráfego de rede, propõe-se um modelo multifractal eficiente que utiliza menos parâmetros que outros modelos presentes na literatura. O modelo MEV (Modelagem Exponencial para a Variância dos multiplicadores) é baseado em uma cascata multiplicativa no domínio *wavelet* capaz de sintetizar amostras de tráfego de rede que apresentam características como autossimilaridade e ampla Largura de Espectro Multifractal (MSW). Para tal finalidade, no modelo MEV, o decaimento de energia dos coeficientes *wavelet* é capturado por meio de uma modelagem exponencial para a variância dos multiplicadores ao longo dos estágios da cascata. Avalia-se o desempenho do modelo MEV em descrever as características do tráfego de rede em comparação a outros modelos presentes na literatura. Para tanto, são utilizadas séries reais de tráfego de rede. Além disso, conduz-se simulações utilizando um cenário simplificado de rede 5G em que o tráfego de entrada da rede é gerado segundo o modelo de tráfego proposto com diferentes parâmetros; avalia-se o desempenho da rede utilizando diferentes técnicas de modulação, sendo elas: OFDM, FBMC, UFMC e f-OFDM.

PALAVRAS CHAVE. Tráfego de Rede, Modelagem Multifractal, 5G

Estatística e Modelos Probabilísticos

ABSTRACT

In this work, in order to model the processes of network traffic, an efficient multifractal model is proposed based on fewer parameters than other models present in the literature. The model MEV (Exponential Modeling for multipliers' Variance) is based on a multiplicative cascade in the wavelet domain capable of synthesizing network traffic traces which present characteristics such as self-similarity and wide Multifractal Spectrum Width (MSW). For such a purpose, in the MEV model, the energy decay of the wavelet coefficients is captured by means of an exponential modeling for the multipliers' variance along the cascade scales. The performance of the MEV model to represent the network traffic characteristics is evaluated in comparison to other models present in the literature. For such a purpose, real network traffic traces are used. Simulations are carried out using a simplified 5G network scenario in which incoming network traffic is generated according to the proposed traffic model with different configurations; the network performance is evaluated using different modulation techniques: OFDM, FBMC, UFMC and f-OFDM.

https://proceedings.science/p/106858?lang=pt-br

KEYWORDS. Network Traffic, Multifractal Modeling, 5G

Statistics and Probabilistic Models

1. Introdução

A heterogeneidade dos fluxos de rede de comunicações fornece comportamento de tráfego variável, tornando o projeto e o gerenciamento de redes de dados uma tarefa desafiadora. Pesquisas mostraram que as técnicas de análise e modelagem que fornecem uma melhor compreensão do comportamento dos fluxos de tráfego de rede são muito importantes no projeto e na otimização das redes de comunicação [Oliveira et al., 2017]. Entre os modelos existentes para a caracterização do comportamento do tráfego de rede, modelos autossimilares e multifractais têm recebido grande atenção devido aos seus desempenhos em termos de modelagem de tráfego de rede [Riedi et al., 1999], [Krishna et al., 2003], [Tuberquia-David et al., 2016]. No entanto, os modelos multifractais podem ser complexos e suas aplicações práticas podem ser limitadas pelo número de seus parâmetros, que geralmente são altos e dependem do número de amostras de tráfego de rede a serem modeladas.

Desta forma, modelos eficientes e menos complexos encontram aplicações em redes de comunicações comerciais, que desde o final da década de 1970, migraram de simples chamadas de voz totalmente analógicas para tecnologias atuais capazes de fornecerem alta qualidade de serviço de banda larga móvel, onde a voz é apenas um bônus no meio de dados que trafegam a várias dezenas de *megabits* por segundo entre dispositivos computacionais localizados em diferentes continentes do mundo. As extensas melhorias em termos de potencialidade de comunicação em redes de comunicações móveis, juntamente com a explosão em número de dispositivos portáteis como *smartphones* e *tablets*, produzem demandas cada vez maiores por baixa latência e alta capacidade de transmissão [Akpakwu et al., 2018].

Com as demandas dos usuários, que crescem de forma exponencial, o 4G que é a principal tecnologia de comunicação móvel da atualidade será em breve substituído pelo 5G. O principal objetivo de evolução das redes de quarta geração para o 5G é baseada nos seguintes desafios que não foram/são efetivamente tratados pelo 4G, isto é, maior capacidade de canal, maior taxa de transmissão de dados, menor latência fim a fim, hiperconectividade, custo reduzido e melhoria na qualidade da experiência de navegação do usuário [Wild et al., 2014].

Neste trabalho, propõe-se um modelo multifractal com o objetivo de gerar amostras sintéticas de tráfego de rede de forma eficiente e utilizando poucos parâmetros. Os dados gerados pelo modelo proposto são utilizados como dados de entrada na simulação de um cenario simplificado de rede 5G no qual as seguintes técnicas de modulação são utilizadas: (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) [Cox, 2012], FBMC (*Filter Bank Multi-Carrier*) [Schaich, 2010], UFMC (*Universal Filtered Multi-Carrier*) [Vakilian et al., 2013] e f-OFDM (*filtered-Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) [Abdoli et al., 2015], [Zhang et al., 2015].

O restante do artigo está organizado da seguinte forma: na Seção 2 é proposto o modelo multifractal MEV; na Seção 3 é apresentado um cenário simplificado de rede baseado no modelo MEV e em modulações candidatas a fazerem parte do 5G. Na Seção 4 é avaliada a eficiência do modelo MEV em comparação a outros modelos presentes na literatura: βMWM (*Multifractal Wavelet Model*) [Riedi et al., 1999], VVGM (*Variable Variance Gaussian Model*) [Krishna et al., 2003] e MFHSW (*MultiFractal Hurst Spectrum Width*) [Tuberquia-David et al., 2016], utilizando dados

https://proceedings.science/p/106858?lang=pt-br

reais, além disso, o desempenho das modulações é avaliado em termos de BER (*Bit Error Rate*), OOBE (*Out-Of-Band Emission*) e PSD (*Power Spectral Density*). Na Seção 5 são apresentadas as conclusões obtidas neste artigo.

2. Modelagem Exponencial para a Variância dos multiplicadores (MEV)

Nesta seção, é apresentada a Proposição 1, e sua respectiva demonstração, que fundamenta o modelo MEV. Em seguida apresenta-se dois algoritmos que constituem o modelo MEV: o **Algoritmo 1** (**Estimação de Parâmetros**) responsável pela modelagem dos parâmetros do modelo MEV com base na estrutura da cascata multiplicativa no domínio *wavelet*, como mostra a Figura 1; o **Algoritmo 2** (**Sintetização de Tráfego**) responsável por gerar amostras sintéticas de tráfego de rede com base nos parâmetros estimados pelo **Algoritmo 1**.

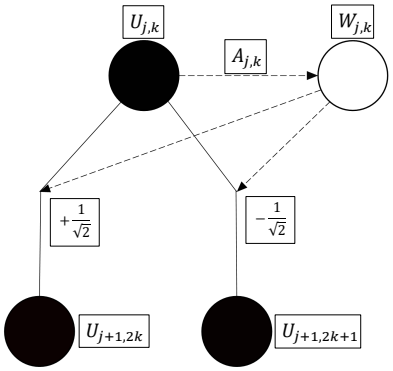


Figura 1: Cascata multiplicativa formada pelos coeficientes de escala $U_{j,k}$, coeficientes *wavelet* $W_{j,k}$ e pelos multiplicadores $A_{j,k}$.

Proposição 1. *Uma série temporal de tráfego real de rede $C(t)$ pode ser descrita por um processo sintético $C^{(n)}[k]$ gerado por meio do modelo MEV que é baseado em três parâmetros: média (μ_c) e desvio padrão (σ_c) do coeficiente de escala $U_{0,0}$ e parâmetro de Hurst (H). A taxa de distribuição (α) e o parâmetro de localização (γ) de uma função exponencial utilizada para modelar a variância dos multiplicadores $A_{(j)}$ são obtidos a partir do valor de H. O processo sintético é definido pela seguinte equação:*

$$C^{(n)}[k] \overset{\mathrm{d}}{=} 2^{-n} G(\mu_c, \sigma_c) \left[1 + \beta\left(\frac{2-4^H}{4^H-4}, \frac{2-4^H}{4^H-4}\right)\right] \times \\ \times \prod_{j=0}^{n-2} \left[1 + \beta\left(\frac{e^{\alpha(j+1-\gamma)}-1}{2}, \frac{e^{\alpha(j+1-\gamma)}-1}{2}\right)\right], \quad (1)$$

onde $k = 0, 1, ..., 2^{j-1}$ é o deslocamento de tempo para $j = 0, 1, ..., n-1$ e n é a variável relacionada à escala de tempo mais fina (de maior resolução) de uma cascata multiplicativa no domínio wavelet.

https://proceedings.science/p/106858?lang=pt-br

Demonstração. O processo para se gerar uma série sintética de tráfego de rede pode ser definido pela seguinte equação [Riedi et al., 1999]:

$$C^{(n)}[k] \stackrel{\mathrm{d}}{=} 2^{-n} U_{0,0} \prod_{j=0}^{n-1} [1 + A_{(j)}], \tag{2}$$

onde $U_{0,0} \stackrel{\mathrm{d}}{=} G(\mu_c, \sigma_c)$ e $A_{(j)}$ representa $A_{j,k}$, pois os multiplicadores podem ser descritos por uma distribuição β simétrica, onde $A_{(j)} \stackrel{\mathrm{d}}{=} \beta(\rho_j, \rho_j)$. Os valores de $\beta(\rho_j, \rho_j)$ estão contidos no intervalo $[-1, 1]$ e tendo-se o parâmetro de *Hurst* (H) calcula-se o parâmetro ρ_j para $j = n - 1$ (última escala), por meio da seguinte equação [Riedi et al., 1999]:

$$\rho_{n-1} = \frac{2^{2H-1} - 1}{2 - 2^{2H-1}}, \tag{3}$$

onde,

$$\lim_{H \to 0.5} \rho_{n-1} = 0 \;\; e \lim_{H \to 1.0} \rho_{n-1} = \infty,$$

logo, $\forall H \in \mathbb{R}, \exists \epsilon > 0 | \lim_{\epsilon \to 0} H \in [0.5 + \epsilon, 1.0 - \epsilon]$.

Pode-se calcular a variância de $A_{(j)}$ em função de ρ_j pela seguinte relação [Riedi et al., 1999]:

$$\begin{aligned} \mathbb{E}[A_{(j)}^2] - \mathbb{E}[A_{(j)}]^2 &= \frac{1}{2\rho_j + 1}, \\ \mathbb{E}[A_{(j)}^2] &= \frac{1}{2\rho_j + 1}, \end{aligned} \tag{4}$$

onde $\mathbb{E}[A_{(j)}] = 0$. Substituindo (3) em (4) pode-se calcular $\mathbb{E}[A_{(j)}^2]$ para a última escala, pela seguinte equação:

$$\mathbb{E}[A_{(n-1)}^2] = \frac{1}{2\frac{2^{2H-1}-1}{2-2^{2H-1}} + 1} = 2^{2-2H} - 1. \tag{5}$$

Assumindo que para $j = 0$ a cascata multiplicativa na primeira escala é formada por apenas um multiplicador $A_{(0)}$, a variância de apenas um termo é teoricamente zero. Na abordagem proposta assume-se que a variância é infinitesimal e definida por:

$$\mathbb{E}[A_{(0)}^2] = \epsilon. \tag{6}$$

Na prática, o valor de ϵ representa o grau de variabilidade entre os valores agregados $(U_{0,0})$ de tempos entre chegadas de amostras de tráfego de rede. Assumindo que a variância dos multiplicadores pode ser modelada por uma função exponencial de 2 parâmetros, obtém-se:

$$\mathbb{E}[A_{(j)}^2] = e^{-\alpha(j+1-\gamma)}, \text{ para } j = 0, 1, ..., n - 1. \tag{7}$$

Substituindo (5) e (6) em (7), obtém-se:

$$\begin{cases} e^{-\alpha(n-\gamma)} &= 2^{2-2H} - 1, \\ e^{-\alpha(1-\gamma)} &= \epsilon. \end{cases} \tag{8}$$

Tendo H como parâmetro de entrada, soluciona-se (8) para obter α e γ:

$$\alpha = \frac{\ln\left(2^{2-2H} - 1\right) - \ln(\epsilon)}{1 - n}, \tag{9}$$

$$\gamma = \frac{\ln\left(2^{2-2H} - 1\right) + \ln(\epsilon) + \alpha(N+1)}{2\alpha}. \tag{10}$$

Com os parâmetros α e γ já estimados pode-se calcular ρ_j para as escalas $j = 0, 1, ..., n-1$. Isolando ρ_j em (4), obtém-se:

$$\rho_j = \frac{1}{2}\left(\frac{1}{\mathbb{E}[A_{(j)}^2]} - 1\right). \tag{11}$$

Substituindo (5) em (11), tem-se ρ_j para a última escala:

$$\rho_{n-1} = \frac{1}{2}\left(\frac{1}{2^{2-2H} - 1} - 1\right) = \frac{2 - 4^H}{4^H - 4}. \tag{12}$$

Substituindo (7) em (11), tem-se ρ_j para as outras escalas da cascata:

$$\rho_j = \frac{1}{2}\left(\frac{1}{e^{-\alpha(j+1-\gamma)}} - 1\right) = \frac{e^{\alpha(j+1-\gamma)} - 1}{2}. \tag{13}$$

Por fim, substituindo (12) e (13) em (2), obtém-se (1): □

No modelo MEV é necessário apenas estimar o valor de ρ_j da última escala, já que os outros valores de ρ_j são calculados de forma paramétrica. Por isso para gerar uma série sintética de tráfego de rede por meio do MEV são necessários apenas 3 parâmetros (μ_c, σ_c e H), o que faz do modelo proposto um algoritmo que não depende da quantidade de amostras de tráfego de rede, ou seja, sempre terá um número fixo de parâmetros. O modelo MEV é dividido em dois algoritmos apresentados a seguir:

Algoritmo 1 (**Estimação de Parâmetros**): Estimação dos parâmetros do modelo MEV a partir de uma série real de tráfego de rede $C(t)$.
Entrada: $C(t)$; Saída: μ_c, σ_c, H.

1. Determinar $U_{j,k}$ e $W_{j,k}$ por meio da DWT (*Discrete Wavelet Transform*), dado que $W_{j,k} = \langle C(t), \psi_{j,k}\rangle$, onde $\psi_{j,k}$ é a *wavelet* de Haar;

2. Utilizar a estrutura da cascata multiplicativa obtida no passo 1, para determinar μ_c e σ_c, média e desvio padrão de $U_{0,0}$, respectivamente;

3. Utilizar $W_{j,k}$ para estimar H por meio do diagrama log-escala (*LD - Logscale Diagram*) proposto por [Abry e Veitch, 1998].

Algoritmo 2 (**Sintetização de Tráfego**): Gerar amostras sintéticas de tráfego de rede com os 3 parâmetros do **Algoritmo 1**.
Entrada: μ_c, σ_c, H; Saída: $C^{(n)}[k]$.

1. Utilizar H como entrada, para determinar α e γ por meio de (9) e (10);
2. Para $j = 0$, gerar $U_{0,0}$ de acordo com a distribuição Gaussiana utilizando μ_c e σ_c;
3. Utilizar α e γ para calcular ρ_j por meio de (12) e (13) para cada escala j, e gerar k valores aleatórios de acordo com a distribuição $\beta(\rho_j,\rho_j)$ para obter $A_{(j)}$;
4. Utilizar (1) para gerar uma série de amostras sintéticas ($C^{(n)}[k]$) de tráfego de rede.

O modelo proposto diferencia-se dos modelos βMWM (*Multifractal Wavelet Model*) [Riedi et al., 1999], VVGM (*Variable Variance Gaussian Model*) [Krishna et al., 2003] e MFHSW (*MultiFractal Hurst Spectrum Width*) [Tuberquia-David et al., 2016], por ser eficiente e não utilizar uma quantidade de parâmetros dependente do número de amostras a serem modeladas. O modelo MEV utiliza um número fixo e reduzido de parâmetros, sendo eles: a média (μ_c) e desvio padrão (σ_c) do tráfego agregado e o parâmetro de *Hurst* (H). Por meio desses parâmetros, é possível gerar tráfego sintético utilizando o **Algoritmo 2**.

3. Cenário Simplificado de Rede 5G Baseado em Diferentes Modulações

Nesta seção, apresenta-se o cenário simplificado de rede $5G$ alimentado pelo tráfego de rede gerado por meio do **Algoritmo 1** e **Algoritmo 2** do modelo proposto (MEV), conforme pode ser observado na Figura 2. O cenário simplificado baseia-se no uso de modulação e codificação adaptativas (AMC - *Adaptive Modulation and Coding*) e nas tecnologias OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) [Cox, 2012], FBMC (*Filter Bank Multi-Carrier*) [Schaich, 2010], UFMC (*Universal Filtered Multi-Carrier*) [Vakilian et al., 2013] e f-OFDM (*filtered-Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) [Abdoli et al., 2015], [Zhang et al., 2015], brevemente descritas a seguir.

A OFDM é eficiente para uma ampla variedade de serviços de comunicação digital, especialmente para banda larga móvel (MBB - *Mobile Broadband*), visto que a OFDM obtém alta eficiência espectral ao subdividir o espectro em subportadoras que se sobrepõem de forma ortogonal, o que proporciona à tecnologia OFDM resistência às condições ruins do meio, como atenuação de altas frequências e interferência intersímbólica (ISI - *Intersymbol Interference*). A OFDM utiliza um prefixo cíclico (CP - *Cyclic Prefix*), que é um tipo de redundância de informação, para reduzir os efeitos da ISI sobre o sinal de informação. Dentre as desvantagens da OFDM, destaca-se: o elevado PAPR (*Peak-to-Average Power Ratio*) e as emissões fora de banda (OOBE - *Out-Of-Band Emission*). Para o 5G, deseja-se manter as vantagens que a OFDM oferece e ao mesmo tempo diminuir seus impactos negativos [Andrews et al., 2014], [Chin et al., 2014].

O FBMC é uma variação do sistema OFDM. Uma das principais vantagens do FBMC é o fato de não utilizar o CP para se combater a ISI, uma vez que a inserção do CP na técnica OFDM

https://proceedings.science/p/106858?lang=pt-br

significa um desperdício de energia. No FBMC, o combate às inteferências é feito utilizando um filtro para as subportadoras, mitigando a interferência entre elas [Schaich, 2010]. O comprimento do filtro no FBMC é tipicamente alto, consumindo mais recursos quando comparado com os filtros da f-OFDM [Zhang et al., 2015].

O UFMC pode ser considerado uma generalização dos sistemas OFDM e FBMC, onde seu objetivo é combinar as vantagens de ambos os sistemas e eliminar suas desvantagens [Vakilian et al., 2013]. No UFMC a banda de um conjunto de N subportadoras compõe uma subbanda. Cada subbanda possui um filtro de comprimento L para reduzir a OOBE [Vakilian et al., 2013]. O comprimento do filtro no UFMC é limitado pelo comprimento do prefixo cíclico usado na OFDM [Zhang et al., 2015].

Na f-OFDM, a alocação de recursos poderá ser mais flexível para diferentes tipos de serviços, ou seja, a largura de banda atribuída poderá ser dividida em várias subbandas e, em cada subbanda, um sistema OFDM convencional poderá ser adaptado para atender às necessidades de determinado tipo de serviço e as características do canal associado [Abdoli et al., 2015], [Zhang et al., 2015]. Além disso, a f-OFDM também fornece reduções significativas no consumo da banda de guarda, levando a uma utilização mais eficiente do espectro [Zhang et al., 2015].

A Figura 2 apresenta o cenário proposto. A rede 5G baseada em diferentes modulações transmite dados sintéticos gerados por meio do modelo MEV (algoritmos 1 e 2).

Neste esquema, uma série real de tráfego de rede pode ser utilizada como entrada para o **Algoritmo 1** (**Estimação de Parâmetros**). Em seguida, com os parâmetros μ_c, σ_c e H, pode-se utilizar o **Algoritmo 2** (**Sintetização de Tráfego**) para gerar amostras de tráfego sintético que serão transmitidas por meio da rede 5G.

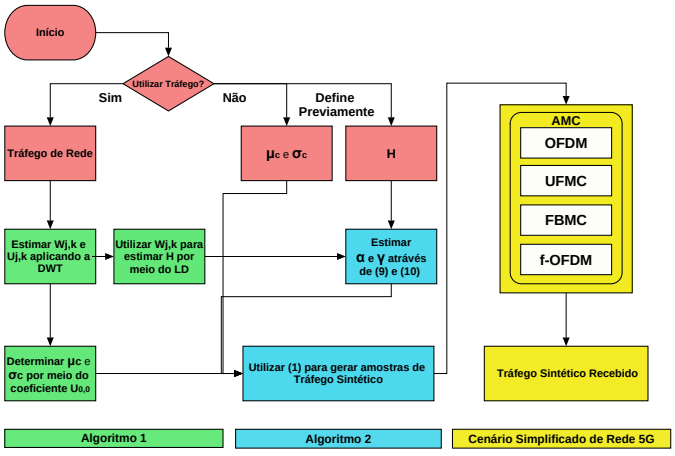


Figura 2: Esquema de conexão entre o modelo MEV e o cenário simplificado de rede 5G.

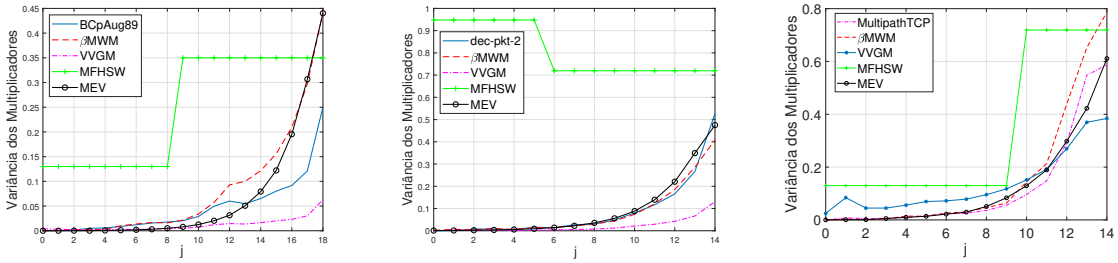
Assim, ampliam-se as possibilidades de uso do modelo MEV, isto é, ele pode ser utilizado para descrever o comportamento de séries reais de tráfego de rede, assim como outros modelos da literatura fazem, ou ainda ser utilizado como ferramenta para testes de desempenho em redes de dados, tais como as redes 5G. Destaca-se ainda que os parâmetros do modelo MEV são mais signi-

ficativos que de outros modelos presentes na literatura por expressarem estatísticas bem conhecidas pelos projetistas de redes: μ_c (média do tráfego acumulado), σ_c (desvio padrão do tráfego acumulado) e H (grau de autossimilaridade das amostras de tráfego).

4. Resultados

Foram conduzidas inicialmente simulações com o objetivo de avaliar o desempenho do modelo MEV em descrever com acurácia as características das séries reais de tráfego de rede. São apresentados resultados obtidos para as séries reais *BCpAug89* [Danzig et al., 2000] e *dec-pkt*-2 [Danzig et al., 2000] que, apesar de não serem atuais, são clássicas na literatura. Além disso, são apresentados os resultados para as série de tráfego *Multipath TCP* [Coninck et al., 2016]. Essas séries de tráfego de rede apresentam amostras de tempo entre chegadas de pacotes dada em segundos. Resultados similares foram obtidos para outras séries reais de tráfego. Os resultados da Tabela 2 e Figura 4c e foram obtidos com uma média de 30 simulações.

As Figuras 3a, 3b e 3c apresentam a variância dos multiplicadores para as séries reais de tráfego $BCpAug89$, $dec\text{-}pkt\text{-}2$ e $MultipathTCP$ e para as séries sintéticas geradas por meio dos modelos βMWM, VVGM, MFHSW e MEV.



(a) (b) (c)

Figura 3: Variância dos multiplicadores para as séries reais e estimadas pelos modelos multifractais.

A respeito dos resultados para a variância dos multiplicadores, para as séries de tráfego analisadas, o modelo MEV, que utiliza menos parâmetros que os demais modelos, obteve desempenho similar ou superior aos demais, em termos de representação da curva da variância real dos multiplicadores. A Tabela 1 corrobora essa afirmação.

Tabela 1: EQM das curvas da variância dos multiplicadores de cada modelo.

Erro Quadrático Médio			
Modelos Multifractais	***BCpAug89***	***dec-pkt-2***	***MultipathTCP***
βMWM	$0,0050$	$0,0205$	$0,0399$
VVGM	$0,0155$	$0,0247$	$0,0438$
MFHSW	$0,0346$	$0,5437$	$0,0797$
MEV	$0,0041$	$0,0204$	$0,0384$

A Tabela 2 apresenta estatísticas para as séries reais e sintéticas geradas a partir dos modelos considerados. Por meio dela é possível observar que o modelo MEV apresentou o menor erro

relativo percentual ($E(\%)$) para o parâmetro de $Hurst$ e largura do espectro multifractal (MSW), além disso apresentou erro apenas ligeiramente maior do que o βMWM para a variância. O VVGM foi o único modelo que apresentou resultados destoantes para a média das amostras para as séries reais de tráfego. O modelo MFHSW obteve o pior desempenho em relação à variância das amostras de tráfego de rede, apresentando um erro relativo percentual alto, que se deve a ineficiência ao estimar a variância dos multiplicadores para diferentes escalas, como mostrou a Figura 3 para diferentes séries reais de tráfego de rede.

Tabela 2: Estatísticas para as séries reais e sintéticas geradas por meio dos modelos βMWM, VVGM, MFHSW e MEV.

BCpAug89	**Média** (10^{-3})	**Variância** (10^{-5})	***H***	***MSW***
Real	$3,00$	$2,90$	$0,7156$	$1,1780$
βMWM E(%)	$3,00\ (0,0)$	$2,90\ (0,0)$	$0,7275\ (1,7)$	$1,1486\ (2,5)$
VVGM E(%)	$3,30\ (10,0)$	$1,48\ (48,9)$	$0,7981\ (11,5)$	$1,1434\ (2,9)$
MFHSW E(%)	$3,00\ (0,0)$	$58,22\ (1907,5)$	$0,7097\ (0,8)$	$1,1665\ (1,0)$
MEV E(%)	$3,00\ (0,0)$	$2,92\ (0,7)$	$0,7141\ (0,2)$	$1,2328\ (0,3)$
dec-pkt-2	**Média** (10^{-3})	**Variância** (10^{-6})	***H***	***MSW***
Real	$2,00$	$8,43$	$0,7195$	$0,7624$
βMWM E(%)	$2,00\ (0,0)$	$8,44\ (0,12)$	$0,6963\ (3,22)$	$0,8962\ (17,5)$
VVGM E(%)	$2,10\ (5,0)$	$9,40\ (11,5)$	$0,7432\ (3,29)$	$1,0688\ (40,2)$
MFHSW E(%)	$2,00\ (0,0)$	$55,18\ (554,5)$	$0,7271\ (1,05)$	$0,8705\ (14,1)$
MEV E(%)	$2,00\ (0,0)$	$7,92\ (6,04)$	$0,7231\ (0,5)$	$0,8493\ (12,7)$
MultipathTCP	**Média** (10^{-2})	**Variância** (10^{-4})	***H***	***MSW***
Real	$1,11$	$7,78$	$0,6092$	$1,2371$
βMWM E(%)	$1,11\ (0,0)$	$7,82\ (0,5)$	$0,6218\ (2,1)$	$1,1465\ (7,3)$
VVGM E(%)	$1,08\ (2,7)$	$4,99\ (35,8)$	$0,7084\ (16,3)$	$1,06\ (1,4)$
MFHSW E(%)	$1,11\ (0,0)$	$54,00\ (594,1)$	$0,6209\ (1,92)$	$1,2463\ (0,7)$
MEV E(%)	$1,11\ (0,0)$	$7,52\ (3,3)$	$0,6041\ (0,8)$	$1,2328\ (0,3)$

A Tabela 3 apresenta os parâmetros necessários para gerar amostras sintéticas de tráfego de rede de acordo com os modelos MEV, βMWM, VVGM e MFHSW. Os modelos βMWM, VVGM, MFHSW apresentam um vetor de parâmetros, onde o tamanho do mesmo depende do número de escalas j (que está diretamente relacionada com a quantidade de amostras de tráfego de rede a serem modeladas), ou seja, quanto maior o número de escalas maior o vetor e consequentemente maior o número de parâmetros. O modelo MEV diferente dos demais modelos comparados apresenta um número fixo e reduzido de parâmetros, que independe do numero de escalas, ou seja, o número de parâmetros independe da quantidade de amostras do tráfego a ser modelado. Analisando o tempo de execução percebe-se que os modelos βMWM e MEV, apresentaram os menores tempos de execução para uma série de tráfego com 1024 e 65536 amostras, respectivamente.

Em seguida, apresenta-se os resultados em termos de densidade espectral de potência (PSD), emissão fora de banda (OOBE) e taxa de erro de *bit* (BER), de acordo com os seguintes parâmetros de simulação: Nº FFT $= 1024$, Subportadoras $= 600$, Largura de Banda $= 10$Mhz,

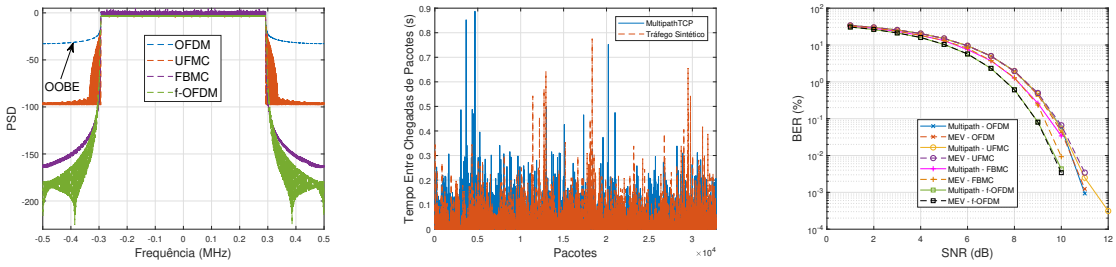
https://proceedings.science/p/106858?lang=pt-br

Tabela 3: Características de cada modelo multifractal em termos dos parâmetros de entrada para a síntese de tráfego de rede e tempo de execução (T. de Execução) dado em segundos.

Características dos Modelos Multifractais			
Modelos	Parâmetros	T. de Execução ($N = 2^{10}$)	T. de Execução ($N = 2^{16}$)
βMWM	μ_c, σ_c, ρ_j	0.0021	0.0233
VVGM	μ e σ_j	0.0373	25.8024
MFHSW	μ_c, σ_c, ρ_j , H, MSW	19.5770	23.0805
MEV	μ_c, σ_c, H	0.0012	0.0195

Modulação AMC e Canal AWGN (*Additive White Gaussian Noise*).

A Figura 4a apresenta a densidade espectral de potência (PSD) dos sistemas OFDM, UFMC, FBMC e f-OFDM. Pode-se avaliar os sistemas por meio da eficiência espectral que mede a eficiência com que um dado sistema de comunicação usa a largura de banda de um canal. Analisando a Figura 4a, para uma largura de banda de 10MHz, constata-se que o sistema f-OFDM apresentou uma menor emissão fora de banda (OOBE), ou seja, obteve o melhor desempenho no uso do espectro, seguido pelo sistema FBMC. Já a OFDM apresentou o pior desempenho em termos de OOBE, o que já era esperado, já que é uma das desvantagens desta técnica de modulação.



(a) (b) (c)

Figura 4: a) Densidade espectral de potêncial (PSD). b) Série real de tráfego de rede e sintética gerada por meio do modelo MEV. c) BER x SNR.

A Figura 4b apresenta a série real de tráfego de rede (*MultipathTCP*) e uma série sintética gerada pelo **Algoritmo 1** e **Algoritmo 2** do modelo proposto (MEV) utilizando a série real de tráfego de rede *MultipathTCP* como referência.

A série real de rede *MultipathTCP* e a série sintética gerada pelo modelo MEV são utilizadas como dados de entrada de acordo com a Figura 2, para avaliar o desempenho das modulações: OFDM, UFMC, FBMC e f-OFDM e avaliar se a BER para o tráfego sintético gerado pelo modelo MEV é similar a BER estimada utilizando a série real de tráfego de rede *MultipathTCP*. A Figura 4c apresenta o desempenho dos sistemas OFDM, UFMC, FBMC e f-OFDM em termos da relação entre BER e SNR (*Signal-to-Noise Ratio*), utilizando a série *MultipathTCP* e a série de tráfego sintético gerado pelo modelo MEV. Analisando a Figura 4c, de modo geral, a f-OFDM apresentou o melhor desempenho quando comparado as outras técnicas de modulação. Observando o compor-

https://proceedings.science/p/106858?lang=pt-br

tamento das curvas de BER para a série real de tráfego *MultipathTCP* e a série sintética gerada pelo modelo MEV, percebe-se que são similares. Logo, constata-se que o modelo MEV consegue gerar amostras sintéticas de tráfego de rede que possui características que estão presentes na série real de tráfego de rede (*MultipathTCP*) e que não compromete, por exemplo, a análise de desempenho das modulações utilizando apenas o tráfego de rede gerado pelo modelo proposto.

5. Conclusões

Neste trabalho, foi proposto o modelo MEV (Modelagem Exponencial para a Variância dos multiplicadores) para caracterização do tráfego de rede com características multifractais. O modelo utiliza uma função exponencial para obter de forma paramétrica a variância dos multiplicadores ao longo das escalas de uma cascata multiplicativa no domínio *wavelet*. Os resultados obtidos por meio de simulações utilizando séries reais de tráfego de rede mostraram que o modelo proposto é eficiente em descrever estatísticas de primeira e segunda ordem (média e variância, respectivamente), parâmetro de *Hurst* e também a largura do espectro multifractal (MSW). O modelo MEV foi comparado aos modelos βMWM, VVGM e MFHSW. Ao contrário dos demais modelos comparados, independente do número de amostras de tráfego que se deseja modelar, o modelo proposto utiliza um número fixo e reduzido de parâmetros (μ_c, σ_c e H). O modelo MEV foi dividido em dois algoritmos, o **Algoritmo 1** (**Estimação de Parâmetros**) é responsável pelo obtenção dos parâmetros do modelo e o **Algoritmo 2** (**Sintetização de Tráfego**) é responsável por gerar amostras de tráfego sintético de rede a partir dos parâmetros obtidos no **Algoritmo 1**. Uma vez obtidos os parâmetros do modelo por meio do **Algoritmo 1**, o projetista ou gerente de rede poderá utilizar o cenário proposto a partir do **Algoritmo 2**.

O modelo MEV foi conectado à um cenário simplificado de rede 5G composto pelas técnicas de modulação OFDM, UFMC, FBMC e f-OFDM, a fim de gerar o tráfego de entrada da rede 5G. Em seguida, o desempenho das modulações utilizadas no cenário de rede foi avaliado em termos de PSD, OOBE e BER. Desta forma, foi possível avaliar o tráfego gerado por meio do modelo proposto em uma simulação mais próxima da realidade e ainda avaliar o desempenho das modulações OFDM, UFMC, FBMC e f-OFDM, candidatas a serem utilizadas no 5G. Para essas redes, características como autossimilaridade, longa dependência entre as amostras e rajadas em diferentes escalas de tempo poderão introduzir dificuldades na otimização do desempenho da rede e na garantia de qualidade de serviço ao usuário. De acordo com os resultados das simulações, a BER em função da SNR obtida da transmissão de dados por meio da rede 5G utilizando a série sintética gerada por meio do modelo MEV é similar àquela obtida utilizando a série de tráfego real, para todas as modulações consideradas. A comparação entre as modulações utilizadas mostra que a f-OFDM é a modulação que possui a menor emissão fora de banda (OOBE) e que isso implica em uma menor BER para um mesmo valor de SNR.

Referências

Abdoli, J., Jia, M., Ma, J., e Technologies, H. (2015). Filtered ofdm: A new waveform for future wireless systems. *IEEE 16th International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC)*.

https://proceedings.science/p/106858?lang=pt-br

Abry, P. e Veitch, D. (1998). A wavelet analysis of long-range dependent traffic. *IEEE Trans. on Information Theory*, 44:2–15.

Akpakwu, G. A., Silva, B. J., Hancke, G. P., e Abu-Mahfouz, A. M. (2018). A survey on 5g networks for the internet of things: Communication technologies and challenges. *IEEE Access*, 6:3619–3647.

Andrews, J. G., Buzzi, S., Choi, W., Hanly, S. V., Lozano, A., e Soong, A. C. K. (2014). What will 5g be. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 32(6):1065–1082.

Chin, W. H., Fan, Z., e Haines, R. (2014). Emerging technologies and research challenges for 5g wireless networks. *IEEE Wireless Communications*, 21(2):106–112.

Coninck, Q. D., Baerts, M., Hesmans, B., e Bonaventure, O. (2016). CRAWDAD dataset uclouvain/mptcp_smartphone (v. 2016-03-04). `https://crawdad.org/uclouvain/mptcp_smartphone/20160304`. Último acesso em 12-04-2018.

Cox, C. (2012). *An introduction to LTE: LTE, LTE-advanced, SAE and 4G mobilecommunications*. John Wiley & Sons, Ltd, United Kingdom.

Danzig, P., Mogul, J., Paxson, V., e Schwartz, M. (2000). The internet traffic archive. `http://ita.ee.lbl.gov/`. Último acesso em 12-04-2018.

Krishna, M. P., Gadre, V., e Desai, U. B. (2003). *Multifractal based network traffic modeling*. Kluwer Academic Publishers.

Oliveira, E. M. R., Viana, A. C., Naveen, K., e Sarraute, C. (2017). Mobile data traffic modeling: Revealing temporal facets. *Computer Networks*, 112:176–193.

Riedi, R., Crouse, M., Ribeiro, V., e Baraniuk, R. (1999). A multifractal wavelet model with application to network traffic. *IEEE Transaction on Information Theory*, **45**(3):992–1018.

Schaich, F. (2010). Filterbank based multi carrier transmission (fbmc) — evolving ofdm: Fbmc in the context of wimax. *European Wireless Conference (EW)*.

Tuberquia-David, M., Vela-Vargas, F., Lópes-Chávez, H., e Hernández, C. (2016). A multifractal wavelet model for the generation of long-range dependency traffic traces with adjustable parameters. *Expert Systems With Applications*, 62(2016):373–384.

Vakilian, V., Wild, T., Schaich, F., ten Brink, S., Frigon, J.-F., e de Montreal, E. P. (2013). Universal-filtered multi-carrier technique for wireless systems beyond lte. *Globecom 2013 Workshop - Broadband Wireless Access*.

Wild, T., Schaich, F., e Chen, Y. (2014). 5g air interface design based on universal filtered uf-ofdm. *19th International Conference on Digital Signal Processing*.

Zhang, X., Jia, M., Chen, L., Ma, J., Qiu, J., Centre, C. R. . D., e Technologies, H. (2015). Filtered-ofdm — enabler for flexible waveform in the 5th generation cellular networks. *IEEE Globecom, San Diego*.

https://proceedings.science/p/106858?lang=pt-br