

Modelagem de tráfego utilizando o Processo de Chegada com Limitante Multifractal

Flávio de M. Pereira, Nelson L. S. da Fonseca e Dalton S. Arantes

Resumo— Neste artigo, propõe-se a modelagem de tráfego multi-escala utilizando processos envelope. Um novo processo, denominado Processo de Chegada com Limitante Multifractal, é apresentado e validado utilizando traços de tráfego real.

Palavras-Chave— Análise de desempenho de redes, engenharia de tráfego, Internet, redes de comunicações banda larga, tráfego multifractal, processos envelope.

Abstract— In this paper, an envelope process called *Multifractal Bounded Arrival Process* (MFBAP) is proposed for multifractal traffic representation. The MFBAP model is validated against real traffic traces, and it is shown that such a model is able to provide an accurate representation of multifractal traffic.

Keywords— Network performance analysis, traffic engineering, Internet, wideband communications networks, multifractal traffic, envelope processes.

I. INTRODUÇÃO

Estudos recentes demonstraram que o tráfego em redes LAN, WAN e na Internet é, do ponto de vista estatístico, invariante em relação à resolução temporal [1]–[9]. Em outras palavras, as medidas estatísticas do tráfego não variam com a escala de tempo na qual são obtidas, nem é possível apontar uma escala de tempo dominante para a caracterização do tráfego. Por este motivo, este tipo de tráfego é denominado tráfego multi-escala.

Diversos trabalhos têm sido direcionados à modelagem do tráfego multi-escala [9]. A importância desta linha de pesquisa advém dos efeitos nocivos do tráfego multi-escala no desempenho das redes, os quais não podem ser adequadamente analisados mediante o uso de modelos de tráfego tradicionais [9]. De fato, o tráfego multi-escala é caracterizado pela ocorrência de surtos de grande intensidade em várias escalas de tempo. Além disso, este tipo de tráfego apresenta dependência de longa duração, cujo principal efeito é a persistência temporal dos surtos de tráfego, o que pode levar a perdas por transbordo nos nós de comutação [9].

Diversos autores argumentam que o conceito de auto-similaridade estatística pode ser utilizado para caracterizar o comportamento do tráfego multi-escala [1]–[4]. Um processo $\mathbf{Z}(t)$ com incrementos estacionários é dito auto-similar se a relação

$$\mathbf{Z}(t) \stackrel{d}{=} m^{-H} \mathbf{Z}(mt), \forall m, t \geq 0, \quad (1)$$

é satisfeita para um dado valor de $0 < H < 1$, onde o símbolo $\stackrel{d}{=}$ representa igualdade em distribuição.

Diversos modelos auto-similares foram propostos para a representação do tráfego em redes [9]. No entanto, estudos mais recentes têm demonstrado que o tráfego pode apresentar um comportamento multi-escala mais complexo, que é melhor representado por meio do conceito de multifractais [4], [7], [8]. Um processo $\mathbf{Z}(t)$ com incrementos estacionários é denominado um processo multifractal se a relação [10]

$$\mathbf{Z}(mt) \stackrel{d}{=} \mathbf{C}(m) \mathbf{Z}(t), \forall m, t \geq 0, \quad (2)$$

é satisfeita, onde $\mathbf{Z}(t)$ e $\mathbf{C}(m)$ são dois processos estocásticos independentes. As características multi-escala do processo $\mathbf{Z}(t)$ são evidenciadas por meio da relação

$$\mathbf{Z}(t) \stackrel{d}{=} m^{-\mathbf{H}(m)} \mathbf{Z}(mt), \forall m, t \geq 0,$$

onde $\mathbf{H}(m) = \log_m \mathbf{C}(m)$. Note que os processos multifractais constituem uma generalização dos processos auto-similares, para os quais $\mathbf{H}(m)$ é constante em relação a m .

Em geral, o tratamento matemático dos processos multifractais não é trivial. Uma opção é o uso de limitantes para o tráfego, denominados processos envelope. Neste caso, o tráfego é modelado por meio de uma função determinística, à qual associa-se a probabilidade de violação, i.e., a probabilidade de que o tráfego exceda esta função. Caso esta probabilidade seja nula, o envelope é dito determinístico. Um processo envelope pode ainda ser classificado como acumulativo, se o limitante é imposto ao tráfego acumulado até um determinado instante de tempo, ou incremental, se ele é imposto à quantidade de tráfego dentro de um intervalo de tempo.

No presente artigo, propõe-se a modelagem de tráfego multi-escala por meio de um processo envelope incremental, denominado Processo de Chegada com Limitante Multifractal (*Multifractal Bounded Arrival Process* — MFBAP). O uso deste processo é validado utilizando traços de tráfego real, sendo demonstrada a sua capacidade de representar, com precisão, o tráfego multi-escala.

O artigo está organizado da seguinte forma. Na Seção II, apresentam-se alguns trabalhos relacionados à modelagem de

Flávio de M. Pereira e Dalton S. Arantes, Faculdade de Eng. Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brasil. E-mails: pereira@decom.fee.unicamp.br, dalton@decom.fee.unicamp.br.

Nelson L. S. da Fonseca, Instituto de Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brasil. E-mail: nfonseca@ic.unicamp.br.

Este trabalho foi financiado por FAPESP (Proc. 01/14379-4), CNPq (Proc. 300064/95-0) e Ericsson Research (Contrato UNI-35/19-2000).

tráfego auto-similar e de tráfego multifractal. Na Seção III, o modelo MFBAP é apresentado. Na Seção IV, este modelo é validado utilizando traços de tráfego real. Finalmente, na Seção V, são apresentadas as conclusões deste trabalho.

II. TRABALHOS RELACIONADOS

Diversos modelos auto-similares têm sido propostos para a representação de tráfego em redes. Em particular, Norros [11] propôs um modelo de tráfego denominado tráfego Browniano fracionário, que é definido como:

$$\mathbf{A}(t) = \mu t + \sigma \mathbf{Z}(t), \quad t \geq 0, \quad (3)$$

onde $\mathbf{A}(t)$ representa o tráfego acumulado até um dado instante t , $\mu > 0$ é a sua taxa média, $\sigma \geq 0$ é um parâmetro associado ao seu desvio-padrão e $\mathbf{Z}(t)$ é um processo do tipo movimento Browniano fracionário, com média zero, fator de auto-similaridade $0.5 \leq H < 1$ e variância $\text{var } \mathbf{Z}(t) = |t|^{2H}$. Estudos recentes indicam que o processo $\mathbf{A}(t)$ também pode ser utilizado para a modelagem de tráfego com distribuição marginal α -estável, assumindo que $\mathbf{Z}(t)$ é um processo do tipo movimento estável [12], [13]. A análise de um sistema de filas simples, alimentado por tráfego Browniano fracionário foi apresentada em [11], [14].

Em [15], propôs-se o uso de um processo envelope para a modelagem de tráfego auto-similar. Este processo, denominado processo envelope do movimento Browniano fracionário, é definido como

$$\hat{A}(t) = \mu t + k\sigma t^H, \quad t \geq 0. \quad (4)$$

Os parâmetros μ , σ e H são equivalentes aos parâmetros do tráfego Browniano fracionário. O parâmetro k determina a probabilidade de que o processo $\mathbf{A}(t)$ exceda o envelope $\hat{A}(t)$ no instante t , i.e.,

$$\mathbb{P} \left\{ \mathbf{A}(t) > \hat{A}(t) \right\} = \mathbb{P} \left\{ \mathbf{Z}(1) > k \right\} = \bar{\Phi}(k), \quad (5)$$

onde $\bar{\Phi}(\cdot)$ representa a função distribuição Gaussiana residual. A partir da definição do processo envelope do movimento Browniano fracionário, um mecanismo de policiamento de tráfego auto-similar, denominado algoritmo do Balde Furado Fractal, foi apresentado em [16].

Note que, por definição, o processo envelope do movimento Browniano fracionário assume que o tráfego tem distribuição marginal Gaussiana, o que nem sempre é verdadeiro [12], [13], [17]. Além disso, este processo não representa adequadamente os incrementos de tráfego, como foi apontado em [18].

De modo a contornar estas limitações, um processo envelope incremental para tráfego auto-similar foi proposto em [18]. Este processo, denominado Processo de Chegada com Limitante Fracionário (*Fractional Bounded Arrival Process* — FBAP), é capaz de representar tanto o tráfego incremental como o tráfego acumulado. Além disso, nenhuma distribuição marginal é, a priori, assumida para o tráfego.

A análise de um sistema de filas alimentado por tráfego FBAP foi apresentada em [18], onde o policiamento deste tipo de tráfego foi também investigado. Demonstrou-se que o algoritmo do Balde Furado pode ser aplicado para policiar tráfego FBAP, e que este algoritmo é capaz de suportar a provisão de limitantes de QoS no caso de um sistema de filas simples. Por outro lado, foi demonstrado que tal capacidade não se verifica no caso do algoritmo do Balde Furado Fractal.

O uso de processos multifractais para modelagem de tráfego ainda é um tema recente. Em [7], Riedi e Véhel analisaram diversos traços de tráfego TCP, e demonstraram que eles satisfazem relações de caráter multifractal. Em [8], Feldmann et al. propuseram o uso de processos multiplicativos para a modelagem do tráfego em redes. Em [19], Molnár et al. analisaram o comportamento assintótico do tamanho da fila em um sistema de filas simples, alimentado por tráfego multifractal.

III. O PROCESSO DE CHEGADA COM LIMITANTE MULTIFRACTAL

Nesta seção, propõe-se um novo processo envelope para a modelagem de tráfego multi-escala. Seja o tráfego acumulado até o instante t dado por

$$\mathbf{A}(t) = \mu t + \gamma \mathbf{Z}(t), \quad t \geq 0, \quad \mathbf{Z}(0) = 0, \quad (6)$$

onde $\mathbf{Z}(t)$ é um processo estocástico multifractal com incrementos estacionários. Em particular, assume-se que um processo $\mathbf{Z}(t)$ com incrementos estacionários é um processo multifractal se a seguinte relação é satisfeita [10]

$$\mathbf{Z}(mt) \stackrel{d}{=} \mathbf{C}(m)\mathbf{Z}(t), \quad m, t \geq 0, \quad (7)$$

onde $\mathbf{Z}(t)$ e $\mathbf{C}(m)$ são dois processos estocásticos independentes. A partir de (7), pode-se concluir que

$$\mathbf{Z}(t) \stackrel{d}{=} \mathbf{C}(t)\mathbf{Z}(1), \quad t \geq 0. \quad (8)$$

Note que $\mathbf{C}(0) = 0$, pois $\mathbf{Z}(0) = 0$. Além disso, dado que os incrementos de $\mathbf{Z}(t)$ são estacionários,

$$\begin{aligned} \mathbf{Z}(t + \tau) - \mathbf{Z}(t) &\stackrel{d}{=} \mathbf{Z}(\tau) - \mathbf{Z}(0) \\ &\stackrel{d}{=} \mathbf{Z}(1) [\mathbf{C}(\tau) - \mathbf{C}(0)] \\ &\stackrel{d}{=} \mathbf{Z}(1)\mathbf{C}(\tau), \quad \tau, t \geq 0. \end{aligned}$$

Os incrementos do processo $\mathbf{A}(t)$ no intervalo $[t; t + \tau]$ são, portanto, dados por

$$\begin{aligned} \Delta \mathbf{A}(t; t + \tau) &= \mathbf{A}(t + \tau) - \mathbf{A}(t) \\ &= \mu\tau + \gamma \mathbf{Z}(1)\mathbf{C}(\tau). \end{aligned} \quad (9)$$

Note que o processo $\Delta \mathbf{A}(\cdot)$ também é estacionário. Um

processo envelope para este processo pode ser definido como

$$\Delta\hat{A}(\tau) = \mu\tau + k\gamma\hat{C}(\tau), \quad \forall \tau \geq 0, \quad (10)$$

onde $\hat{C}(\tau)$ é um envelope para o processo $\mathbf{C}(\tau)$. O processo envelope $\Delta\hat{A}(\tau)$ será denominado Processo de Chegada com Limitante Multifractal (*Multifractal Bounded Arrival Process* — MFBAP). Note que este processo pode ser visto como uma generalização do Processo de Chegada com Limitante Fracionário [18], o qual é obtido quando $\hat{C}(\tau) = \tau^H$, $0 < H < 1$.

Para o cálculo da probabilidade de violação do envelope $\Delta\hat{A}(\tau)$, supor-se-á que o envelope $\hat{C}(\tau)$ é determinístico. Embora seja aparentemente restritiva do ponto de vista matemático, tal suposição é razoável pois, na prática, capacidade de geração e de transporte de tráfego é sempre limitada. Isto significa que, para τ finito, a distribuição marginal de $\mathbf{C}(\tau)$ tem suporte finito. Assim, um envelope determinístico para este processo sempre pode ser obtido.

Assim, a probabilidade de que os incrementos de tráfego excedam o envelope $\Delta\hat{A}(\tau)$ é dada por

$$\begin{aligned} \mathbb{P}\{\Delta\mathbf{A}(\cdot) > \Delta\hat{A}(\tau)\} &= \\ &= \mathbb{P}\{\mu\tau + \gamma\mathbf{Z}(1)\mathbf{C}(\tau) > \mu\tau + k\gamma\hat{C}(\tau)\} \\ &\leq \mathbb{P}\{\mathbf{Z}(1) > k\} \\ &= \bar{F}_{\mathbf{Z}}(k), \end{aligned} \quad (11)$$

onde $\bar{F}_{\mathbf{Z}}(\cdot)$ representa a função distribuição residual da variável aleatória $\mathbf{Z}(1)$.

O envelope MFBAP para um dado traço de tráfego pode ser obtido a partir da definição de um envelope empírico. Seja $\mathbf{A}[n]$ a série temporal para a qual se deseja obter o envelope, i.e.,

$$\mathbf{A}[n] = \mathbf{A}(nT), \quad n \in \mathbb{N}, T \geq 0.$$

Os incrementos discretos correspondentes a $\mathbf{A}[n]$ são dados por:

$$\begin{aligned} \Delta\mathbf{A}_{(i)}[n] &= \mathbf{A}[(n+1)i] - \mathbf{A}[ni] \\ &= \mu Ti + \gamma\mathbf{Z}[i], \quad n, i \in \mathbb{N}, \end{aligned} \quad (12)$$

onde $\mathbf{Z}[i]$ é o processo discreto correspondente a $\mathbf{Z}(t)$. A realização do processo $\Delta\mathbf{A}_{(i)}[n]$ é dada por $\Delta A_{(i)}[n]$. Note que $\Delta A_{(i)}[n]$ corresponde justamente ao traço para o qual deseja-se obter o envelope MFBAP.

O envelope empírico para o processo $\Delta\mathbf{A}_{(i)}[n]$ é definido como

$$\Delta A^{(e)}[i] = \mu Ti + Z^{(e)}[i], \quad (13)$$

onde,

$$\mu = \frac{1}{T} \mathbb{E}\{\Delta A_{(1)}[n]\}. \quad (14)$$

$$Z^{(e)}[i] = \{x \in \mathbb{R} : \mathbb{P}\{\Delta\mathbf{A}_{(i)}[n] - \mu Ti > x\} = \varepsilon\}, \quad (15)$$

sendo ε a probabilidade de violação desejada. Supondo que haja um número suficientemente grande de amostras na seqüência $\Delta A_{(i)}[n]$, a probabilidade indicada em (15) pode ser aproximada pela frequência relativa do evento $\{\Delta\mathbf{A}_{(i)}[n] - \mu Ti > x\}$ sempre que a sua distribuição não for conhecida.

Utilizando o envelope empírico, os parâmetros do modelo MFBAP são obtidos da seguinte maneira. O parâmetro μ é dado por (14). O envelope $\hat{C}(\tau)$ é obtido através da análise gráfica da relação $\log Z^{(e)}[i] \times \log i$ dentro de uma faixa suficientemente ampla de escalas de tempo i . A expressão matemática de $\hat{C}(\tau)$ é escolhida de modo que a relação $\log \hat{C}(iT) \times \log i$ seja, do ponto de vista estrutural, semelhante a $\log Z^{(e)}[i] \times \log i$. Finalmente, os parâmetros de $\hat{C}(\tau)$ e o produto $k\gamma$ são obtidos utilizando técnicas de aproximação de funções, de modo que, em $\tau = iT$, $k\gamma\hat{C}(\tau)$ seja um limitante superior para $Z^{(e)}[i]$ com violação desprezível. Desta maneira, garante-se que o envelope MFBAP tem probabilidade de violação menor ou igual a ε dentro da faixa de escalas de tempo considerada.

IV. VALIDAÇÃO DO MODELO

Nesta seção, o uso do envelope MFBAP é ilustrado. Os traços a serem representados correspondem a amostras de tráfego de redes e a amostras de vídeo MPEG, os quais apresentam característica multi-escala [3], [20]–[23].

Os traços ATP e TALK1 são seqüências de vídeo MPEG com 4×10^4 amostras, cada uma correspondendo ao tamanho (em bytes) de um quadro de vídeo. Os quadros são gerados a uma taxa de 20fps e, portanto, cada amostra corresponde à quantidade de tráfego que flui por meio da rede durante um intervalo de 50ms.

O traço LBLTCP3 corresponde a amostras de tráfego TCP coletadas na rede do Lawrence Berkeley National Laboratory [3], [20], [21]. Estas amostras foram pré-processadas para criar uma seqüência com 72×10^3 amostras, que representam a quantidade de tráfego (em bytes) que flui por meio da rede a cada 100ms.

Para os envelopes, escolheu-se uma probabilidade de violação ε igual a 10^{-4} . As Figuras 1 a 3 apresentam a relação $\log Z^{(e)}[i] \times \log i$ correspondente a cada um dos traços analisados. Note que, nos três casos, esta relação é aproximadamente log-sigmoidal. Por isso, ela não pode ser adequadamente representada por meio de modelos auto-similares, para os quais esta relação é linear. Por exemplo, no caso do modelo FBAP, o termo que aproxima $Z^{(e)}[i]$ é dado por $k\gamma\tau^H$, que, no plano log-log, resulta na relação linear

$$\log k\gamma\tau^H = \log k\gamma + H \log \tau.$$

As Figuras 1 a 3 mostram a aproximação obtida no caso do modelo FBAP. Para cada um dos traços, os parâmetros do modelo são mostrados na Tabela I. É possível concluir que, para garantir a probabilidade de violação especificada para o envelope, o modelo FBAP tende a ser conservador.

Por outro lado, a relação $\log Z^{(e)}[i] \times \log i$ de cada um dos traços pode ser representada utilizando um modelo MFBAP, no qual

$$\widehat{C}(\tau) = \tau^{H(\tau)},$$

onde,

$$H(\tau) = H_0 + \gamma_H \exp \left\{ -\frac{[\ln(\tau) - \mu_H]^2}{2\sigma_H^2} \right\}.$$

Note que o modelo MFBAP proposto requer apenas 6 parâmetros¹ para a caracterização do tráfego, o que assegura sua parcimônia.

As Figuras 1 a 3 mostram, para cada um dos traços analisados, a aproximação obtida no caso do modelo MFBAP. Os parâmetros do modelo são mostrados na Tabela II. Neste caso, os resultados obtidos são significativamente melhores do que aqueles obtidos no caso do modelo FBAP. Isto se torna mais claro observando as Figuras 4 a 6, nas quais o envelope empírico, o envelope FBAP, o envelope MFBAP e o erro relativo correspondente a cada um dos modelos, dado por

$$e[i] = \frac{\Delta \widehat{A}(iT) - \Delta A^{(e)}[i]}{\Delta A^{(e)}[i]},$$

são apresentados.

Finalmente, é importante notar que outros traços foram também utilizados para validação do modelo MFBAP proposto [24]. Por motivos de restrição de espaço, os resultados não serão apresentados neste artigo.

V. CONCLUSÕES

Neste artigo, propôs-se a modelagem de tráfego utilizando um processo envelope denominado Processo de Chegada com Limitante Multifractal (*Multifractal Bounded Arrival Process* — MFBAP). Este processo foi validado utilizando traços de tráfego real, sendo demonstrada a sua capacidade de representar, com precisão, o tráfego multi-escala.

Atualmente, pesquisas estão sendo conduzidas no sentido de analisar o comportamento de sistemas de filas sob tráfego MFBAP, com foco na provisão de QoS. Embora esta análise tenha sido anteriormente conduzida para o caso do tráfego FBAP [18], [24], a extensão dos resultados não é trivial, devido à falta de soluções analíticas para os problemas de otimização envolvidos.

¹Obviamente, pode-se considerar que o produto $k\gamma$ constitui apenas um único parâmetro.

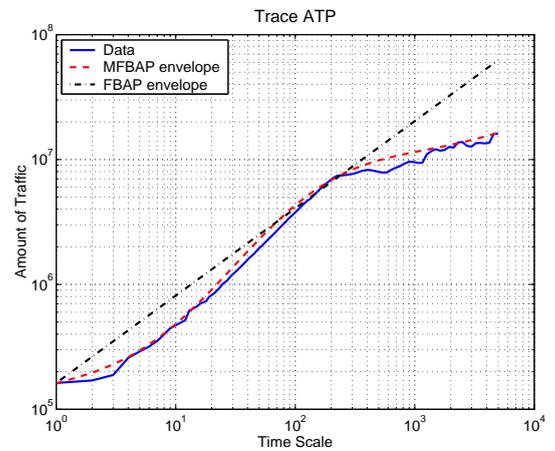


Fig. 1. Relação $\log Z^{(e)}[i] \times \log i$ para o traço ATP, e sua aproximação para o caso dos modelos FBAP e MFBAP.

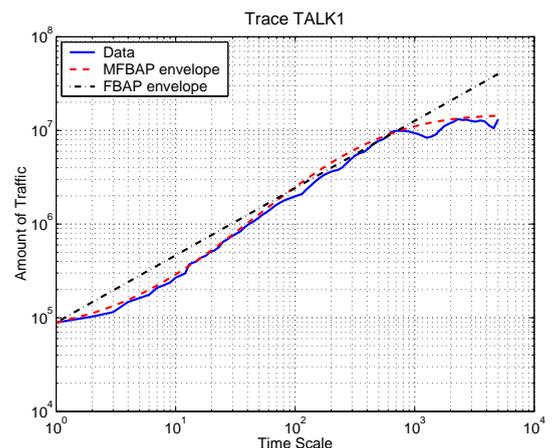


Fig. 2. Relação $\log Z^{(e)}[i] \times \log i$ para o traço TALK1, e sua aproximação para o caso dos modelos FBAP e MFBAP.

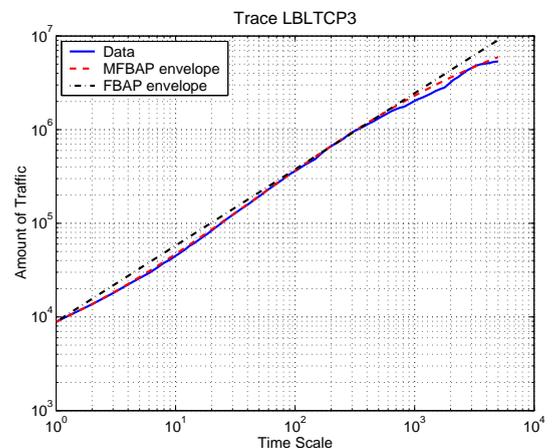


Fig. 3. Relação $\log Z^{(e)}[i] \times \log i$ para o traço LBLTCP3, e sua aproximação para o caso dos modelos FBAP e MFBAP.

TABELA I
PARÂMETROS DOS ENVELOPES FBAP.

Trace	μ	$k\gamma$	H
ATP	5.47×10^5	1.54×10^6	0.699
LBLTCP3	3.39×10^4	3.76×10^5	0.814
TALK1	3.63×10^5	8.96×10^5	0.717

TABELA II
PARÂMETROS DOS ENVELOPES MFBAP.

Trace	μ	$k\gamma$	H_0	γ_H	σ_H	μ_H
ATP	5.47×10^5	1.14×10^6	0.468	0.557	2.130	0.317
LBLTCP3	3.39×10^4	3.65×10^5	0.465	0.437	4.840	-1.232
TALK1	3.63×10^5	6.50×10^5	0.369	0.608	3.080	0.870

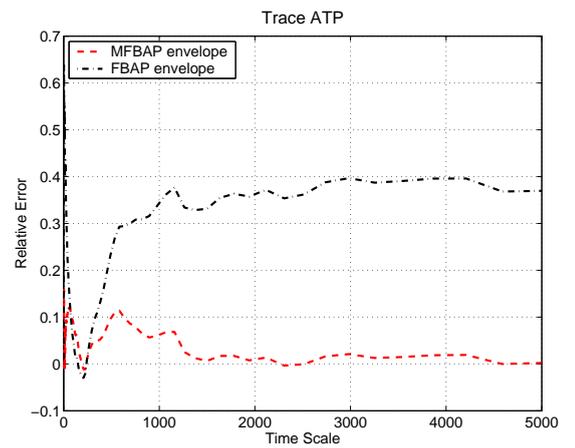
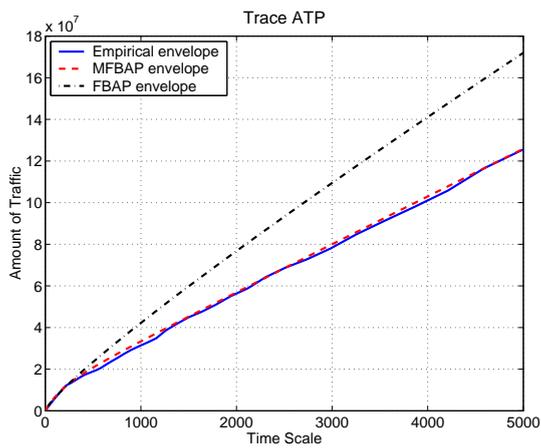


Fig. 4. Representação do traço ATP utilizando os envelopes FBAP e MFBAP: (a) envelope empírico, FBAP e MFBAP; (b) erro relativo decorrente do uso dos envelopes FBAP e MFBAP.

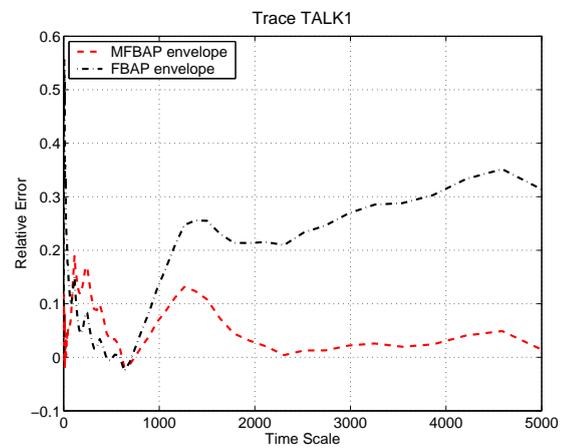
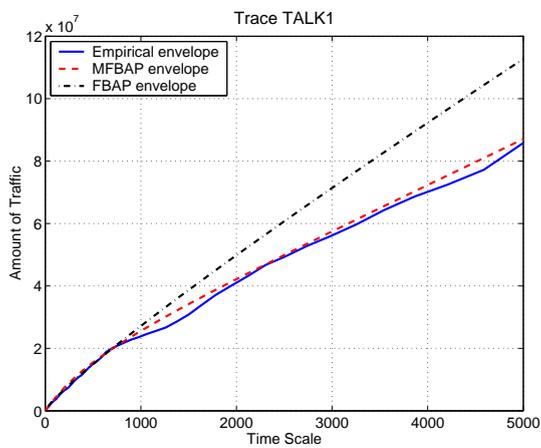


Fig. 5. Representação do traço TALK1 utilizando os envelopes FBAP e MFBAP: (a) envelope empírico, FBAP e MFBAP; (b) erro relativo decorrente do uso dos envelopes FBAP e MFBAP.

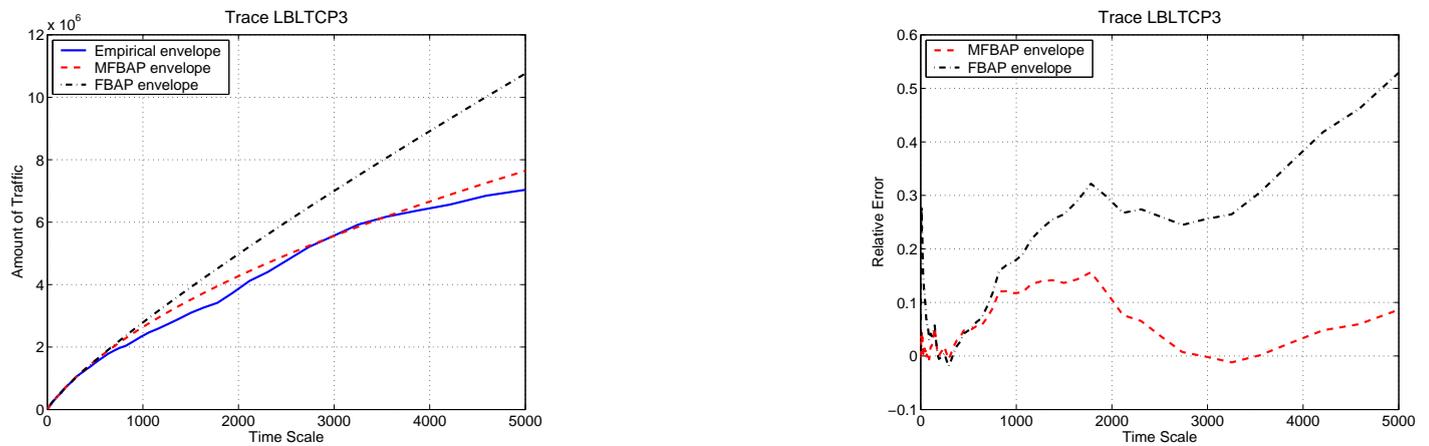


Fig. 6. Representação do traço LBLTCP3 utilizando os envelopes FBAP e MFBAP: (a) envelope empírico, FBAP e MFBAP; (b) erro relativo decorrente do uso dos envelopes FBAP e MFBAP.

REFERÊNCIAS

- [1] W. E. Leland, W. Willinger, M. S. Taqqu, and D. Wilson, "On the self-similar nature of ethernet traffic (extended version)," *IEEE/ACM Trans. Networking*, vol. 2, pp. 1–15, Feb. 1994.
- [2] M. W. Garret and W. Willinger, "Analysis, modeling and generation of self-similar VBR video traffic," in *Proc. ACM/SIGCOMM*, pp. 269–280, 1994.
- [3] V. Paxson and S. Floyd, "Wide area traffic: The failure of poisson modeling," *IEEE Trans. Networking*, vol. 3, pp. 226–244, June 1995.
- [4] M. Taqqu, V. Teverovsky, and W. Willinger, "Is network traffic self-similar or multifractal?," *Fractals*, vol. 5, pp. 63–73, 1997.
- [5] W. Willinger, M. S. Taqqu, R. Sherman, and D. V. Wilson, "Self-similarity through high-variability: statistical analysis of ethernet LAN traffic at the source level," *IEEE/ACM Trans. Networking*, vol. 5, pp. 71–86, Feb. 1997.
- [6] M. E. Crovella, "Self-similarity in WWW traffic: evidence and possible causes," *IEEE Trans. Networking*, vol. 5, pp. 835–845, Dec. 1997.
- [7] R. H. Riedi and J. L. Véhel, "TCP traffic is multifractal: a numerical study," Research Report 3129, INRIA, Mar. 1997.
- [8] A. Feldmann, A. C. Gilbert, and W. Willinger, "Data networks as cascades: Investigating the multifractal nature of internet WAN traffic," in *Proc. SIGCOMM*, (Vancouver, Canada), pp. 42–55, Sept. 1998.
- [9] K. Park and W. Willinger, eds., *Self-similar network traffic and performance evaluation*. New York: Wiley, 2000.
- [10] B. Mandelbrot, A. Fisher, and L. Calvet, "A multifractal model of asset returns," Cowles Foundation Discussion Paper 1164, Yale University, Sept. 1997.
- [11] I. Norros, "On the use of fractional brownian motion in the theory of connectionless networks," *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. 13, pp. 953–962, Aug. 1995.
- [12] A. Karasaridis and D. Hatzinakos, "A non-gaussian self-similar process for broadband heavy-traffic modeling," in *Proc. IEEE/GLOBECOM*, (Sydney, Australia), 1998.
- [13] A. Karasaridis and D. Hatzinakos, "Broadband heavy-traffic modeling using stable self-similar processes," in *2nd Canadian Conference on Broadband Research*, (Ottawa, Canada), pp. 157–168, June 1998.
- [14] I. Norros, "A storage model with self-similar input," *Queueing Syst.*, vol. 16, pp. 387–396, 1994.
- [15] G. S. Mayor and J. A. Silvester, "Time scale analysis of an ATM queueing system with long-range dependent traffic," in *Proc. IEEE/INFOCOM*, pp. 205–212, 1997.
- [16] N. L. S. Fonseca, G. S. Mayor, and C. A. Viana Neto, "On the equivalent bandwidth of self-similar sources," *ACM Trans. on Modeling and Computer Simulation*, vol. 10, pp. 104–124, Apr. 2000.
- [17] T. Mikosch, S. Resnick, H. Rootzén, and A. Stegeman, "Is network traffic approximated by stable Lévy motion or fractional Brownian motion?," Tech. Rep. 1247, Cornell University, 1999.
- [18] F. M. Pereira, N. L. S. Fonseca, and D. S. Arantes, "Fractional bounded arrival process for self-similar traffic policing," in *Proc. IEEE/ICC*, (Anchorage, USA), May 2003. Aceito para publicação.
- [19] S. Molnár, T. D. Dang, and I. Maricza, "On the queue tail asymptotics for general multifractal traffic," in *Proc. Networking*, (Pisa, Italy), 2002.
- [20] "The internet traffic archive." URL: <http://ita.ee.lbl.gov/>.
- [21] V. Paxson, "Fast approximation of self-similar network traffic," Tech. Rep. LBL-36750, Lawrence Berkeley Laboratories, 1995.
- [22] O. Rose, "Statistical properties of MPEG video traffic and their impact on traffic modeling in ATM systems," Tech. Rep. 101, Institute of Computer Sciences, University of Würzburg, 1995.
- [23] O. Rose, "Simple and efficient models for variable bit rate MPEG video traffic," *Perf. Eval.*, vol. 30, pp. 69–85, 1997.
- [24] F. M. Pereira, N. L. S. Fonseca, and D. S. Arantes, "Fractal traffic modeling and policing," Relatório Técnico, 2003. Em desenvolvimento.