

# **SOBRE A APLICABILIDADE DO MODELO DE TRÁFEGO PSEUDO AUTO-SIMILAR PARA A ALOCAÇÃO DE RECURSOS EM REDES ATM**

*Murilo E. Y. Nascimento*  
Centro de Informática – UFPE  
meyn@cin.ufpe.br

*José A. S. Monteiro*  
Departamento de Engenharia – UNIFACS  
suruagy@unifacs.br

## **RESUMO**

Estudos têm demonstrado a natureza auto-similar de diversas fontes de tráfego. Modelos não auto-similares usados anteriormente levam a um subdimensionamento dos recursos necessários para se atingir a qualidade de serviço desejada para uma dada conexão. Neste artigo, é investigado o comportamento do modelo pseudo auto-similar, resolvido de forma exata e através da aproximação *Chernoff-Dominant Eigenvalue* (CDE), em termos da probabilidade de perda de células, quando comparado aos resultados obtidos com um gerador de tráfego sintético baseado no movimento Browniano fracional (FBM), considerado aqui como uma representação mais fiel do tráfego real. Pelos resultados obtidos, o modelo pseudo auto-similar é inicialmente conservador, passando depois a otimista. As faixas de aplicabilidade e a magnitude dos erros obtidas com a comparação com o FBM variaram bastante tornando a sua aplicabilidade restrita a cenários onde o tráfego não apresente uma dependência de longo alcance muito acentuada.

## **ABSTRACT**

Several studies have shown the self similar nature of data traffic sources. Non self similar models previously used lead to underestimating the resources required to achieve a desired quality of service for a given connection. In this paper is investigated the behavior of the pseudo self similar model solved exactly and that of the *Chernoff-Dominant Eigenvalue* (CDE) approximation in terms of their cell loss probabilities when compared to the results obtained with a synthetic traffic generator based on the Fractional Brownian Motion (FBM) which is considered here as the closest to the real traffic. The results show that the pseudo self similar model is initially conservative, and becomes overoptimistic. The applicability range and error magnitude in their comparison with FBM vary too much, restricting its applicability to scenarios where the traffic does not present a heavy long range dependency.

## **1. INTRODUÇÃO**

O correto dimensionamento de recursos e um controle de admissão eficaz das redes de alta velocidade com garantia da qualidade de serviço (QoS) e, em particular, das redes ATM, dependem em grande parte da habilidade dos modelos de tráfego em representar fidedignamente as características do tráfego real. Inúmeros modelos são apresentados na literatura, com comportamentos e finalidades diversas. Todavia, no já clássico artigo de Leland *et al.* [8], mostrou-se que o tráfego de redes

Ethernet possui a instigante característica de preservar suas propriedades estatísticas por diversas escalas de tempo.

Estudos posteriores têm consistentemente detectado a mesma natureza auto-similar em diversos outros tipos de tráfego, incluindo B-ISDN/ATM [6]. Portanto, existe hoje o consenso de que os modelos de tráfego devem capturar esta característica tão fundamental para que se possa fazer previsões com um mínimo de confiabilidade.

Alguns exemplos de modelos auto-similares são o movimento Browniano fracional (FBM - *Fractional Brownian Motion*) e o F-ARIMA (*Fractional - AutoRegressive Integrated Moving-Average*). Estes, por sua vez, são de difícil tratamento matemático

Tentando conseguir um bom compromisso entre a tratabilidade e a coerência com a realidade, diversos pesquisadores propuseram modelos tradicionais que mimetizam com maior ou menor eficiência a auto-similaridade. Um destes modelos foi o pseudo auto-similar introduzido por Robert e Le Boudec [14][15]. A principal vantagem deste modelo é a sua simplicidade. Em [13], o modelo pseudo auto-similar foi comparado em relação a alguns outros modelos tradicionais com dependência de curto alcance, e constatou-se que apresenta realmente um comportamento bem distinto quanto à taxa de perda de células (CLR - *Cell Loss Rate*). Não foram encontradas referências que o comparem neste aspecto a modelos genuinamente auto-similares.

Por fim, quando se pensa em aplicações voltadas para o gerenciamento da rede, mesmo os modelos tradicionais mais simples são resolvidos normalmente de forma aproximada. Neste sentido, Elwalid *et. al* [4] propuseram a aproximação *Chernoff-Dominant Eigenvalue* (CDE) para o cálculo da banda efetiva associada ao tráfego gerado por uma determinada fonte ou conjunto de fontes. Seu atrativo seria o baixo custo computacional, fator crítico para a aplicação em esquemas de controle de admissão realistas nas redes ATM, onde as decisões devem ser tomadas em tempo real. O pressuposto básico assumido para o uso da aproximação é que as fontes possam ser representadas por modelos Markovianos, como o pseudo auto-similar. Todavia, vale ressaltar que a mesma não tem a pretensão de representar a auto-similaridade.

Neste artigo pretende-se: a) investigar o comportamento do modelo pseudo auto-similar em termos da probabilidade de perda de células quando comparado a um modelo de tráfego efetivamente auto-similar, buscando uma definição mais precisa das condições de aplicabilidade e limitações do mesmo para o dimensionamento de recursos da rede; e b) investigar a viabilidade de utilização da aproximação CDE em um eventual

mecanismo de controle de admissão baseado no modelo pseudo auto-similar.

A estrutura deste artigo é a seguinte: na seção 2 são apresentados os principais modelos para tráfego auto-similar; a seção 3 apresenta os métodos de solução para a multiplexação estatística de tráfego auto-similar; a seção 4 apresenta os resultados obtidos; e, finalmente, a seção 5 apresenta as nossas conclusões.

## 2. MODELOS PARA TRÁFEGO AUTO-SIMILAR

Nesta seção serão apresentados os modelos FBM, FGN e pseudo auto-similar utilizados para representar fontes de tráfego e que serão usados no nosso estudo.

### 2.1 Modelos FBM e FGN

O movimento Browniano fracional (FBM - *Fractional Brownian Motion*) e o ruído Gaussiano fracional (FGN - *Fractional Gaussian Noise*) foram introduzidos por Mandelbrot e Van Ness [10] como generalizações do movimento Browniano e do ruído Gaussiano ordinários. Embora suas aplicações iniciais tenham sido em economia e hidrologia, ao longo do tempo estes processos vêm sendo empregados na modelagem de fenômenos em áreas da biologia, química e física, geração de paisagens artificiais por computação gráfica e, mais recentemente, para modelagem de tráfego em redes de comunicação. O FBM normalizado com parâmetro de auto-similaridade  $H \in [0, 1]$  é um processo estocástico  $Y(t)$ ,  $t \geq 0$ , de espaço amostral contínuo caracterizado pelas seguintes propriedades [1]:

1.  $Y(t)$  é Gaussiano;
2.  $Y(t)$  possui incrementos estacionários  $X(t)$ ;
3.  $Y(0) = 0$  e  $E[Y(t) - Y(s)] = 0$ ;
4.  $E[(Y(t) - Y(s))^2]$  é dado por

$$R_X(k) = \frac{1}{2} [(k+1)^{2H} - 2k^{2H} + (k-1)^{2H}].$$

Os incrementos  $X(t) = Y(t) - Y(t-1)$  definem o FGN.

O FBM tem sido bastante utilizado para a geração de tráfego sintético com dependência de longo alcance, item indispensável para a realização de estudos de desempenho que visem o dimensionamento realista dos recursos da rede. Se por um lado o seu tratamento analítico não é trivial, o modelo é conceitualmente simples, parcimonioso em termos de parâmetros (apenas 3) e existem algoritmos eficientes para simulá-lo, como será visto na próxima seção. Estes fatores, por exemplo, levaram Erramilli e Wang [5] a sugerirem um algoritmo de controle de admissão para tráfego auto-similar baseado no FBM.

Outro aspecto importante do FBM é o fato de ser um processo exatamente auto-similar, ou seja, a relação de escalonamento  $Y(t) = c^{-H}Y(ct)$  vale para qualquer fator de escala  $c$ . Tal propriedade não se verifica necessariamente nas amostras de tráfego das redes de comunicação. Estudos observaram comportamento fractal por um número significativo porém limitado de escalas de tempo, motivando alguns pesquisadores a proporem novos modelos como o pseudo auto-similar, que será visto a seguir, levando em conta este fato.

### 2.2 Modelo Pseudo Auto-Similar

A maioria dos modelos para tráfego auto-similar não possui tratamento matemático simples, restringindo sua utilização a estudos de desempenho baseados normalmente em simulação, como é o caso do FBM. Por outro lado, estudos iniciais com amostras de tráfego real encontraram evidências de que a estrutura de correlação se preserva por um número considerável de escalas de tempo, de 4 a 5 ordens de magnitude, mas ainda assim finito [8]. Isto significa que não haveria efetivamente dependência de longo alcance nas amostras de tráfego, o que motivou outros pesquisadores como Robert e Le Boudec [14][15] a proporem modelos alternativos baseados em processos Markovianos capazes de mimetizar a natureza fractal limitada descrita acima.

Em [14], os autores analisam alguns arquivos com medições realizadas na rede local Ethernet da Bellcore compreendendo essencialmente tráfego de dados IP, ignorando portanto tráfego de voz, som e vídeo. Ao restringirem um pouco mais o contexto para considerar apenas o protocolo TCP, eles sugerem três níveis principais de comportamento em que o tráfego Ethernet pode ser examinado: o nível da conexão, o nível de transporte ou TCP/IP e o nível Ethernet. Portanto, cada nível corresponde a uma certa resolução de tempo, o que poderia justificar a observação empírica de que a estrutura de correlação se mantém por uma faixa limitada de escalas de tempo. Um modelo Markoviano foi então construído em cima destas considerações.

O modelo proposto consiste em um modulador Markoviano com cadeia homogênea e estacionária de  $n$  estados a tempo discreto (Figura 1). As variáveis aleatórias do processo  $X(t)$ ,  $t > 0$ , representando o número de células enviadas no intervalo  $[t-1, t)$ , podem assumir então os valores 0 e 1.

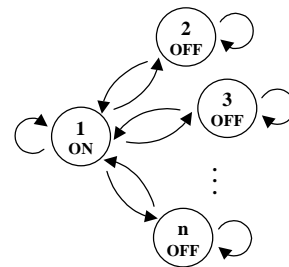


Figura 1 - Modulador Markoviano.

A matriz estocástica  $P$  do modulador é definida por [14]

$$P = \begin{bmatrix} 1-1/a - \dots - 1/a^{n-1} & 1/a & \dots & 1/a^{n-1} \\ b/a & 1-b/a & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ (b/a)^{n-1} & 0 & \dots & 1-(b/a)^{n-1} \end{bmatrix}$$

Percebe-se então que a cadeia de Markov possui apenas três parâmetros:  $a$ ,  $b$  e o número de estados  $n$ . Nesse caso, existe uma única solução estacionária para as probabilidades de equilíbrio ( $\pi$ ).

Como se desprende dos rótulos ON e OFF da Figura 1, o vetor de taxas  $R$  da fonte possui dimensão  $n$  e é igual a  $R = [1 \ 0 \ \dots \ 0]^T$ .

O processo  $X(t)$  apresenta auto-similaridade em um domínio limitado de escalas de tempo, no qual pode ser determinado um parâmetro de Hurst local. O modelo apresenta então o que foi qualificado como pseudo dependência de longo alcance [14], por estar limitada à referida região, e daí sua denominação de pseudo auto-similar. Na verdade, a estrutura de  $P$  tenta embutir a quantidade finita de resoluções de tempo, relacionadas aos níveis mencionados, que em tese constituem o tráfego de uma rede local Ethernet.

### 3. MULTIPLEXAÇÃO ESTATÍSTICA DE TRÁFEGO AUTO-SIMILAR

Nesta seção será abordado o problema da multiplexação estatística em redes ATM, especialmente a obtenção da taxa de perda de células, que é a principal medida de QoS. Este tipo de estudo envolve necessariamente um modelo de tráfego e um de multiplexador. As técnicas de solução dos sistemas fonte/multiplexador, seja via tratamento analítico ou simulação, são geralmente específicas e, em alguns casos, bastante complicadas. Tendo em vista os objetivos iniciais deste trabalho, o escopo será então restrito à multiplexação estatística de fontes pseudo auto-similares, resolvida de forma exata e através da aproximação *Chernoff - Dominant Eigenvalue*, e de fontes FBM, resolvida através de simulação. Considerar-se-á somente a fila simples sem prioridades (disciplina FIFO).

#### 3.1 Resolução Analítica

Em [14], os autores sugerem a utilização do algoritmo MBH (*Matrix Block-Hessenberg*) [7] para calcular a probabilidade de perda no multiplexador ATM alimentado por fontes pseudo auto-similares. Todavia, em [13] os autores ressaltam a explosão do número de estados da cadeia de Markov fonte/multiplexador como um dos principais empecilhos para a obtenção de resultados mais abrangentes, constatando que a implementação do algoritmo sugerida em [7] não consegue escalar bem com o aumento das dimensões do sistema.

Portanto, optou-se neste trabalho por utilizar a ferramenta TANGRAM-II [2] para resolução analítica do pseudo auto-similar, na tentativa de superar as limitações encontradas com o MBH. Detalhes da linguagem de programação e dos métodos de solução para cadeias de Markov que a ferramenta suporta podem ser obtidos a partir da referência citada.

#### 3.2 Aproximação Chernoff - Dominant Eigenvalue

Usando análise de fluidos, Elwalid e Mitra [3] estenderam a técnica de obtenção da banda efetiva para fontes Markovianas em geral a taxas constantes, que foi ainda aperfeiçoada posteriormente em [4]. Neste último artigo, os autores se valem da teoria estatística sobre o comportamento probabilístico dos grandes desvios das variáveis aleatórias em relação às suas médias (*large-deviations theory*) [9] para a determinação do limite superior

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \log P(X \geq Nk) \leq -C_2 k - C_1 \quad (1)$$

e do limite inferior

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \log P(X \geq Nk) \geq -C_2 k - C_3, \quad k \geq k_0$$

para a probabilidade de *overflow*  $P(X \geq Nk)$  em um multiplexador alimentado por fontes homogêneas. No caso,  $X$  é a ocupação do *buffer*,  $N$  é o número de fontes,  $k$  é a capacidade de *buffer* por fonte  $K/N$  e  $C_1, C_2, C_3$  e  $k_0$  são constantes positivas.

Considerando a probabilidade de *overflow*  $P(X \geq K)$  no *buffer* infinito como uma estimativa da probabilidade de perda, os autores propõem a aproximação

$$P(X \geq K) \approx e^{-NC_1} e^{-C_2 K}$$

baseada na equação (1). Fazendo  $L = e^{-NC_1}$  e  $z = -C_2$ , então

$$P(X \geq K) \approx L e^{zK}.$$

Pode ser mostrado que  $L$  é a perda no sistema sem *buffer* dada pelo teorema de Chernoff e  $z$  ( $e^z$ ) o autovalor dominante do sistema completo a tempo contínuo (discreto). Este último determina o comportamento da probabilidade de *overflow* em escala de log para grandes *buffers*.

Embora o modelo pseudo auto-similar seja a tempo discreto, a aproximação foi implementada para os dois casos (discreto e contínuo) no MatLab.

#### 3.3 Solução através de Simulação

Visando uma compreensão mais clara das implicações de se utilizar o modelo pseudo auto-similar no contexto das redes de alta velocidade, foi decidido compará-lo ao FBM em termos das probabilidades de perda de células no multiplexador.

No caso das configurações de sistema avaliadas neste trabalho, mostrou-se fundamental a geração de seqüências de tráfego bastante longas, de forma a se conseguir resultados representativos em uma região de *buffers* que viabilizasse uma comparação com o pseudo auto-similar. Foi obtida pela Web a implementação estado da arte de Norros *et al.* [12] para o algoritmo RMD (*Random Midpoint Displacement*). O código em C foi compilado e testado em uma estação Sun Ultra 1/170 com 320 Mb de memória RAM e 1Gb de memória virtual. Com estes recursos de hardware, a implementação do RMD gerou seqüências com até  $2^{25}$  incrementos.

Depois de obtida a seqüência  $X(t)$  normalizada (média 0 e variância 1) de incrementos FGN, esta é ajustada para as estatísticas desejadas através da fórmula de Norros [11]:

$$A(t) = m + \sqrt{am} X(t),$$

onde  $m$  é a média do número de células geradas por unidade de tempo e  $a$  o fator de variação, definido como a razão entre a variância e a média. Para que o processo estocástico  $A(t)$  seja interpretado como tráfego de pacotes, os incrementos devem ser convertidos em valores inteiros não negativos. Com estas transformações, o tráfego perde as características originais, tanto em termos dos momentos quanto do parâmetro de Hurst. Além disso, a própria distribuição marginal deixa de ser Gaussiana.

Portanto, para execução das simulações relacionadas aos experimentos descritos na próxima seção, foram determinados empiricamente os parâmetros de entrada (média, variância e  $H$ )

que produzem seqüências FBM tais que, após a manipulação descrita, resultam em amostras de tráfego com os mesmos parâmetros assumidos na resolução dos modelos analíticos baseados no modelo pseudo auto-similar.

Para avaliar as seqüências discretizadas, utilizou-se o estimador do parâmetro de Hurst baseado em *wavelets* de Abry e Veitch [16], o mesmo utilizado por Norros *et. al* em sua análise do algoritmo RMD [12]. Aqueles autores mostram que as suas características em termos de robustez, precisão e eficiência computacional igualam ou superam as do estimador de máxima probabilidade de Whittle, considerado na literatura um dos mais precisos.

Eles disponibilizaram na Internet uma implementação do estimador para o MatLab, que foi empregada na avaliação das amostras de tráfego FBM geradas pelo algoritmo RMD. Todavia, com as dimensões das mesmas na ordem de longos  $2^{25}$  slots, não foi possível a estimação do  $H$  a partir das seqüências completas devido basicamente à limitação de memória do hardware utilizado, uma máquina Windows NT/Intel com 64 Mb de RAM, já que não havia disponível a versão Unix do MatLab no Centro de Informática da UFPE. Tendo em vista a complexidade das técnicas envolvidas, portar o estimador para a plataforma C/Unix fugia do escopo definido para este trabalho. De qualquer forma, o parâmetro de Hurst foi estimado em cima dos  $2^{22}$  slots iniciais das amostras (Tabela 1).

Tabela 1: Parâmetro de Hurst das seqüências geradas.

$N^o$ Fontes	2	3	4	5
$H$	$H_e$			
0,75	0,752±0,008	0,755±0,008	0,752±0,008	0,752±0,008
0,80	0,796±0,008	0,796±0,008	0,800±0,008	0,800±0,008
0,85	0,849±0,006	0,856±0,008	0,856±0,008	0,853±0,008

#### 4. RESULTADOS PRELIMINARES

Nesta seção serão relatados os resultados preliminares do nosso estudo, comparando as probabilidades de perdas obtidas através da simulação do FBM (considerada aqui como uma representação mais fiel do tráfego real) e as perdas obtidas a partir da resolução do modelo pseudo auto-similar para 4 e 5 estados usando a ferramenta TANGRAM-II [2] e os resultados obtidos a partir da aproximação CDE.

Dado às limitações da simulação em se obter resultados para baixíssimas probabilidades de perda, os resultados obtidos para *buffers* menores foram extrapolados através de uma aproximação Weibulliana da forma

$$P_{ES}(k) = ae^{-bk^c},$$

onde  $a$ ,  $b$  e  $c$  são constantes positivas,  $P_{ES}(k)$  é a probabilidade estimada e  $k$  o tamanho do *buffer* [11].

Neste estudo, foram utilizados os seguintes parâmetros: capacidade do canal = 1; taxa média de cada fonte = 0,05; o

número de fontes foi variado de 2 a 5 e o parâmetro de Hurst das mesmas ( $H$ ) entre 0,75 e 0,85.

Como pode ser observado pelas figuras abaixo, ficou patente que o modelo pseudo auto-similar não consegue representar a dependência de longo alcance esperada para as configurações consideradas no estudo. Até certo ponto, isto era esperado, pois ele só manifesta dependência de longo alcance por um número finito de escalas de tempo.

O modelo pseudo auto-similar é conservador, isto é, estima uma maior probabilidade de perdas, na faixa de *buffer* em que a curva da simulação permanece abaixo das 3 curvas correspondentes ao modelo. A partir deste ponto, ao utilizarmos os resultados obtidos com o modelo, estaríamos subestimando a probabilidade de perdas e portanto estas estimativas não seriam adequadas para a alocação dos recursos da rede.

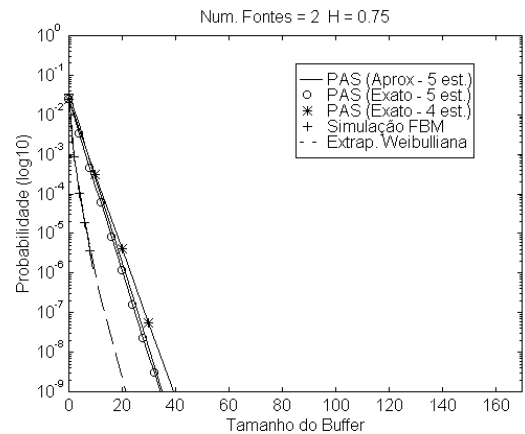


Figura 2 - Probabilidades de perdas para 2 fontes com  $H=0,75$ .

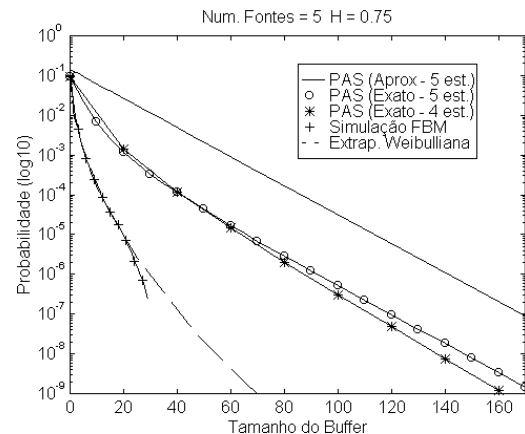


Figura 3 - Probabilidades de perdas para 5 fontes com  $H=0,75$ .

Por outro lado, fica evidente como as taxas de perda aumentam com o número de fontes multiplexadas, já que isto resulta na majoração do tamanho média da fila, e com o parâmetro de Hurst, por ampliar a magnitude das flutuações na taxa de chegada.

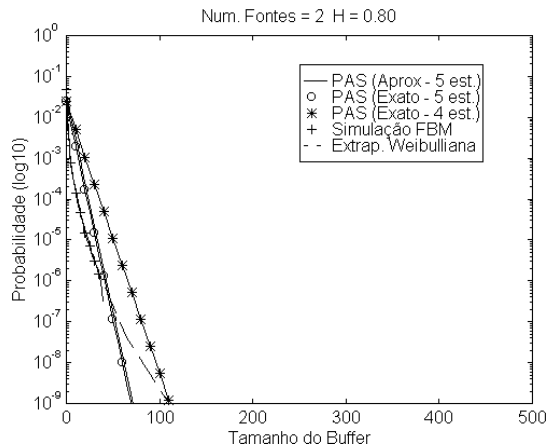


Figura 4 - Probabilidades de perdas para 2 fontes com  $H=0,80$ .

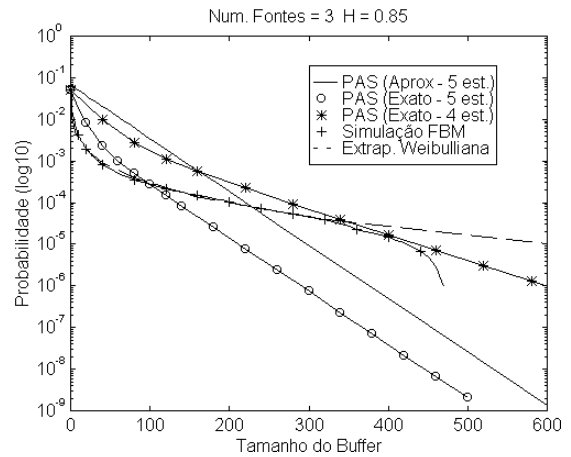


Figura 7 - Probabilidades de perdas para 3 fontes com  $H=0,85$ .

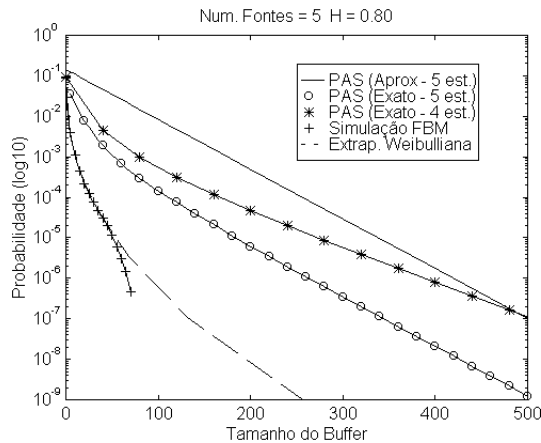


Figura 5 - Probabilidades de perdas para 5 fontes com  $H=0,80$ .

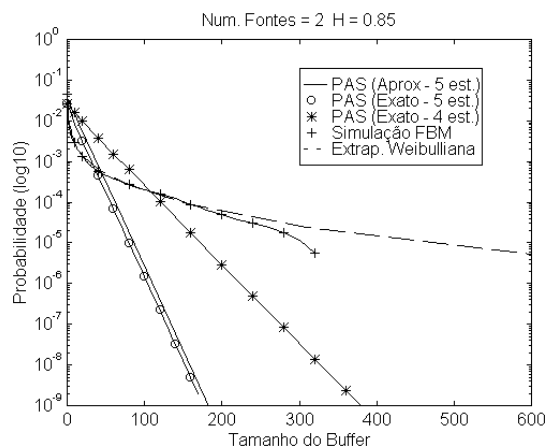


Figura 6 - Probabilidades de perdas para 2 fontes com  $H=0,85$ .

Para valores altos de  $H$  (Figura 6 e Figura 7), pode-se observar que a faixa de validade do modelo encontra-se numa região de perdas altas, limitando então o seu uso para fontes de tráfego que tolerem tais perdas. Aparentemente, apenas para valores de  $H$  menores que 0,75 a faixa atinge probabilidades de interesse ( $10^{-9}$  para redes ATM) com um diferença tolerável entre as previsões do pseudo auto-similar e do FBM, isto quando não se multiplexa mais de duas fontes.

Em relação à aproximação CDE, esta apresentou resultados coerentes com o que se propõe ao considerar a inclinação assintótica do decaimento exponencial em escala de log da probabilidade de perda dada pelo autovalor dominante e a estimativa da perda do sistema sem *buffer* prevista pelo teorema de Chernoff. Como pode ser constatado em todos os gráficos, a inclinação obtida pela aproximação coincide perfeitamente com a queda da probabilidade para *buffers* grandes encontrada no modelo pseudo auto-similar. A estimativa para a perda inicial também ficou coerente. Fica bem evidente aqui a natureza Markoviana do modelo. Entretanto, quanto mais o pseudo auto-similar consegue representar a dependência de longo alcance, isto é, quanto maior a faixa em que a probabilidade de perda tem um decaimento não exponencial, menos representativa se torna a aproximação. Isto pode ser verificado quando se aumenta o agregado de fontes para um mesmo parâmetro de Hurst.

Desta forma, a aproximação poderia ser considerada em dois cenários. O primeiro seria quando o parâmetro de Hurst fica próximo de 0,5. No outro caso, estão as situações específicas onde o 'joelho' da curva é bem pequeno, como nas faixas de aplicabilidade para duas fontes. Este fato, somado às evidências de que o pseudo auto-similar em si possui aplicabilidade limitada para modelagem de tráfego auto-similar, indica que o uso da aproximação CDE aplicada ao modelo é questionável. De qualquer forma, esta heurística pode ser encarada em termos genéricos como um limite superior da probabilidade de perda na faixa em que o pseudo auto-similar seja aplicável.

## 5. CONCLUSÕES

Era de se esperar, seja qual fosse o sistema considerado, que haveria sempre uma região limitada de *buffers* em que as probabilidades de perdas seriam adequadamente representadas pelo modelo pseudo auto-similar, devido à sua própria natureza Markoviana. Isto é, a explosividade acentuada em todas as escalas de tempo observada no tráfego auto-similar é que mantém as perdas altas mesmo para grandes tamanhos de *buffers*. Buscou-se então determinar a extensão e a precisão desta faixa de aplicabilidade. Uma primeira constatação importante foi o fato desta faixa se restringir a valores de probabilidade muito altos com o aumento do parâmetro de Hurst, quando o decaimento se torna muito lento e o pseudo auto-similar não tem “fôlego” para chegar às taxas de interesse.

A agregação de fontes pseudo auto-similares aumenta sensivelmente a diferença entre as probabilidade previstas pelo modelo e a as obtidas com a simulação de tráfego auto-similar equivalente. Nos sistemas estudados, mais de duas fontes já podem introduzir erros consideráveis. Este quadro sugere que o escopo do mesmo esteja realmente restrito à representação de tráfego já agregado, ou seja, no contexto em que Robert o validou, ao invés de fontes individuais. Imaginou-se que um sistema onde cada fonte representaria o tráfego de redes locais distintas convergindo para um comutador ATM, por exemplo, poderia ser investigado com o pseudo auto-similar.

Quanto ao uso da aproximação CDE em conjunto com o modelo, fica aparentemente restrito a valores muito altos ou muito baixos do parâmetro de Hurst. No primeiro caso, irrelevante pela faixa de probabilidades envolvidas, isto acontece porque o próprio modelo se torna bem mais preciso, mitigando a imprecisão da mesma. No último caso, que se mostra mais viável, tem-se a multiplexação de tráfego agregado, de preferência obtido a partir de uma única fonte pseudo auto-similar, para valores de  $H$  menores que 0,75. Todavia, como a utilização da aproximação se voltaria para o controle de admissão em um contexto genérico, estas restrições não são cabíveis na prática.

De um modo geral, o modelo pseudo auto-similar não apresentou um comportamento robusto, previsível. As faixas de aplicabilidade e a magnitude dos erros obtidas com a comparação com o FBM variaram bastante. Ainda assim, vale ressaltar que estas conclusões foram obtidas a partir de regimes típicos de utilização dos sistemas, que não excede a 0,25 (5 fontes, no nosso caso). A investigação do comportamento do modelo pseudo auto-similar e da aproximação CDE em regimes de carga mais elevada certamente poderia fornecer elementos para uma determinação ainda mais acurada da aplicabilidade dos mesmos na presença de tráfego auto-similar.

## 6. REFERÊNCIAS

- [1] Beran, Jan. *Statistics for Long-Memory Processes*. In: Cox, D. et al. (Ed.). *Monographs on Statistics and Applied Probability*. New York: Chapman & Hall, v.61, p.1-66, 1994.
- [2] Carmo, R., et al. "Performance/Availability Modeling with the TANGRAM-II Modeling Environment". *Performance Evaluation*, v.33, n.1, p.45-65, Jun. 1998.
- [3] Elwalid, A., Mitra, D. "Effective Bandwidth of General Markovian Traffic Sources and Admission Control of High Speed Networks". *IEEE/ACM Trans. on Networking*, v.1, n.3, p.329-343, Jun. 1993.
- [4] Elwalid, A., et al. "Fundamental Bounds and Approximations for ATM Multiplexers with Applications to Video Teleconferencing". *IEEE JSAC*, v.13, n.6, p.1004-1016, Aug. 1995.
- [5] Erramilli, A., Wang, J. "A Connection Admission Control Algorithm for Self-Similar Traffic". In: *Proc. Globecom'99*, Rio de Janeiro, p.1623-1628, Dec. 1999.
- [6] Jerkins, J., et al. "A Closer Look at ATM Traffic Measurements and Their Statistical Analysis". In: *Proc. Globecom'99*, Rio de Janeiro, p.1361-1366, Dec. 1999.
- [7] Leboudec, J. "An Efficient Solution Method for Markov Models of ATM Links with Loss Priorities". *IEEE JSAC*, v.9, n.3, p.408-417, Apr. 1991.
- [8] Leland, W., et al. "On the Self-Similar Nature of Ethernet Traffic (Extended Version)". *IEEE/ACM Trans. on Networking*, v.2, n.1, p.1-15, Feb. 1994.
- [9] Lewis, J., Russel, R. "An Introduction to Large Deviations for Teletraffic Engineers". 1998. Disponível via Internet em <http://www.statslab.cam.ac.uk/~rrw1/ld/LD-tutorial.ps>
- [10] Mandelbrot, B., Van Ness, J. "Fractional Brownian Motions, Fractional Noises and Applications". *SIAM Review*, v.10, p.422-437, 1968.
- [11] Norros, I. "A Storage Model with Self-Similar Input". *Queueing Systems – Theory and Applications*, v.16, n.3/4, p.387-396, 1994.
- [12] Norros, I., et al. "Simulation of Fractional Brownian Motion with Conditionalized Random Midpoint Displacement". *Advances in Performance Analysis*, v.2, n.1, p.77-101, 1999.
- [13] Oliveira, A., Monteiro, J. "Modelos de Tráfego para a Multiplexação Estatística do Tráfego de Dados em Redes ATM". In: *Anais do XVI SBRC*, Rio de Janeiro, p.703-722, maio 1998.
- [14] Robert, S., Leboudec, J. "On a Markov Modulated Chain Exhibiting Self-Similarities over Finite Timescale". *Performance Evaluation*, v.27/28, p.159-173, Oct. 1996.
- [15] Robert, S., Leboudec, J., "New Models for Self-Similar Traffic". *Performance Evaluation*, v.30, n.1/2, p.57-68, Jul. 1997.
- [16] Veitch, D., Abry, P. "A Wavelet Based Joint Estimator of the Parameters of Long-Range Dependence". *IEEE Trans. on Information Theory*, v.45, n.3, p.878-897, Apr. 1999.