

# Modelos de Tráfego para a Multiplexação Estatística do Tráfego de Dados em Redes ATM

**Adriano L. I. Oliveira**

Tribunal de Contas do Estado de Pernambuco

Núcleo de Informática

R. da Aurora, 885/1<sup>o</sup> Andar, Boa Vista

50050-000 Recife-PE

E-mail: adriano@tce.pe.gov.br

**José A. S. Monteiro**

Universidade Federal de Pernambuco

Departamento de Informática

Caixa Postal 7851

50732-970 Recife-PE

E-mail: suruagy@di.ufpe.br

## Resumo

O tráfego de aplicações de comunicação de dados será responsável por uma parcela considerável do tráfego das redes ATM. Recentemente, novos modelos de tráfego foram propostos na literatura para o tráfego de dados. Para o tráfego agregado de uma rede local, foi proposto o modelo *auto-similar* ou *fractal*, enquanto que para o tráfego a nível de fontes individuais, foi proposto o modelo *ON-OFF Pareto*. Esses modelos estão fundamentados em análises estatísticas rigorosas de uma grande quantidade de diferentes amostras de tráfego e apresentam propriedades estatísticas bastante distintas das propriedades dos modelos tradicionalmente usados para o tráfego de dados. Neste artigo, estudamos a multiplexação estatística do tráfego de dados em redes ATM, tanto a nível do tráfego agregado de redes quanto a nível de fontes individuais. No caso do tráfego agregado, nossa meta foi determinar o impacto do modelo auto-similar na multiplexação estatística (com relação aos modelos de Poisson e ON-OFF exponencial) e a viabilidade do uso do modelo *pseudo auto-similar* em estudos desse tipo. No caso de fontes individuais, comparamos o novo modelo ON-OFF Pareto com o modelo ON-OFF exponencial com relação ao ganho de multiplexação estatística e à Alocação de Capacidades.

## Abstract

The traffic generated by data communication applications will be responsible for a considerable percentage of ATM network traffic. New data traffic models have been recently proposed in the literature. The *Self-similar* or *fractal* model has been proposed for the aggregate traffic of a local network while the *Pareto ON-OFF* model has been proposed for the traffic at the source level. These models are based on rigorous statistical analysis of a great amount of diverse traffic samples and have very different statistical properties when compared with traditional models. In this paper we study the statistical multiplexing of data traffic in ATM networks at aggregate and source levels. In the case of aggregate traffic we aimed at determining the impact of the self-similar model in statistical multiplexing (with respect to the Poisson and exponential ON-OFF models) and the feasibility of using the pseudo self-similar model in this kind of study. In the case of source level traffic we compared the novel Pareto ON-OFF traffic model with the exponential ON-OFF model with respect to statistical multiplexing gains and allocated bandwidth.

## 1 Introdução

A Rede Digital de Serviços Integrados de Faixa Larga (RDSI-FL) — que está em processo de padronização pelo ITU-T (*International Telecommunication Union Telecommunications Standardization Sector*) — pretende fornecer uma infra-estrutura única para transportar todos os serviços de comunicação existentes (de voz, vídeo e dados) e os que venham a surgir de forma eficiente e a altas taxas de transmissão. O modo de transferência assíncrono (ATM) foi escolhido pelo ITU-T como técnica de transmissão e multiplexação para a RDSI-FL. A garantia de qualidade do serviço (QoS) para serviços de características diversas e a multiplexação estatística, através da qual é possível utilizar o canal de transmissão de forma mais eficiente, estão entre os principais motivos que levaram o ITU-T a escolher o ATM. Dentre os principais serviços a serem oferecidos na fase inicial, estará a interconexão de redes locais (LANs) e metropolitanas (MANs) herdadas (expressão usada aqui para designar todas as redes que não sejam ATM, em particular as redes locais da família IEEE 802.X) através da RDSI-FL.

No caso de ambientes locais e metropolitanos, a crescente demanda por velocidades mais altas e a impossibilidade das LANs e MANs atuais fornecerem essas velocidades tem motivado a utilização do ATM nesses ambientes. Para que o ATM tenha sucesso nesses ambientes, sua interoperação com as redes herdadas é fator fundamental. Algumas arquiteturas têm sido propostas com essa finalidade, entre elas a *Emulação de LANs sobre ATM*, pelo Fórum ATM [TJB<sup>+</sup>95, Kav95, AB97] e o *IP sobre ATM*, pelo IETF (*Internet Engineering Task Force*) [Hei93, Lau94, Atk94, CGST94, LH96].

Um dos pontos cruciais para o sucesso do ATM, tanto em redes públicas quanto em redes locais é a utilização de mecanismos de gerenciamento de tráfego — como o Controle de Admissão de Chamadas (CAC) — eficazes. O gerenciamento de tráfego em redes de comunicação lida com o controle dos recursos da rede com o objetivo de evitar o congestionamento. Para prevenir que congestionamento se forme é necessário que os recursos de rede (capacidades de transmissão, memória dos multiplexadores) sejam alocados corretamente. Essa alocação pode ser feita através de estudos de avaliação de desempenho usando técnicas analíticas ou simulação. Para que os resultados fornecidos pela avaliação de desempenho sejam verossímeis é fundamental a utilização de um modelo estatístico de tráfego que represente de forma fiel as características do tráfego em estudo.

O tráfego de dados representará uma parcela considerável do tráfego de redes ATM, devido à necessidade de interconexão de LANs e MANs e à utilização de aplicações desenvolvidas para redes locais herdadas. Assim, é importante entender o comportamento desse tipo de tráfego para dimensionar corretamente a rede ATM e projetar mecanismos de gerenciamento de tráfego apropriados. Recentemente, pesquisadores da Bellcore mostraram que o tráfego agregado de uma rede Ethernet deve ser modelado por um processo estocástico *auto-similar* ou *fractal*, que apresenta propriedades estatísticas drasticamente diferentes daquelas dos modelos de tráfego empregados tradicionalmente (e.g., Poisson e ON-OFF exponencial) [LTWW94]. Com o objetivo de reutilizar as técnicas analíticas disponíveis para modelos Markovianos, Robert e Le Boudec propuseram um modelo Markoviano *pseudo auto-similar* [RB97, Rob96] para o tráfego Ethernet agregado, que aproxima as características estatísticas de processos auto-similares. A partir de pesquisas sobre a explicação física para a auto-similaridade do tráfego agregado, Willinger et al. [WTSW97] mostraram que o tráfego de dados individual (i.e., de cada uma das fontes que compõem o agregado) deve ser modelado por uma fonte ON-OFF Pareto. Este modelo apresenta propriedades bastante distintas do modelo ON-OFF exponencial tradicionalmente empregado.

Neste trabalho, estudamos o impacto dos novos modelos para o tráfego de dados tanto agregado (modelo pseudo auto-similar) quanto individual (modelo ON-OFF Pareto) nos

estudos de multiplexação estatística e alocação de capacidades com relação aos resultados obtidos com os modelos tradicionais. Discutimos, adicionalmente, a viabilidade do uso do modelo pseudo auto-similar em estudos analíticos de multiplexação estatística.

O restante do artigo está dividido da seguinte forma: na próxima seção apresentamos o conceito de multiplexação estatística e o problema da alocação de capacidades. Na seção 3 apresentamos os modelos para o tráfego de dados que serão usados nos nossos estudos. A seção 4 apresenta os resultados do estudo de multiplexação estatística com modelos que representam o tráfego agregado, enquanto que a seção 5 apresenta os resultados para fontes individuais. Finalmente, na seção 6 apresentamos as conclusões do trabalho.

## 2 Multiplexação Estatística e Alocação de Capacidades

A alocação de capacidades é um dos métodos propostos na literatura para o Controle de Admissão de Chamadas (CAC). Ela consiste em determinar, através do estudo preciso da multiplexação estatística das fontes, a capacidade efetiva requerida por cada uma delas. Uma conexão é aceita se o canal dispuser da capacidade efetiva necessária. A alocação de capacidades é feita através de métodos analíticos ou simulação que normalmente gastam um tempo proibitivo (em relação ao tempo que o CAC dispõe para decidir sobre a aceitação da chamada) para determinar a capacidade efetiva. Ela é importante como referência, para comparar as diversas propostas para o CAC.

Na prática, uma nova chamada só é aceita se a rede dispuser de recursos para ela (levando em conta a QoS solicitada) em cada comutador e em cada enlace que esteja no caminho entre a origem e o destino da chamada. Estudos exatos de modelos desse tipo são impossíveis, assim, normalmente se estuda o multiplexador estatístico existente em cada porta de saída dos comutadores ATM. A figura 1 mostra um multiplexador estatístico ATM com *buffer* de comprimento  $K$  (em número de células) e canal de capacidade  $W$  (em bits/s) sendo alimentado por  $N$  fontes de tráfego distintas com a mesma taxa média ( $B_m$ , em bits/s) e a mesma taxa de pico ( $B_p$ , em bits/s). O *problema da alocação de capacidades* consiste de: dada uma mistura de  $N$  fontes distintas que alimentam um multiplexador com *buffer* de tamanho  $K$ , deseja-se encontrar a capacidade  $W$  do canal que deve ser alocada a esta mistura de tráfego de modo a satisfazer uma determinada QoS. Ao longo deste trabalho, consideraremos a QoS como sendo expressa pela taxa de perda de células (CLR), que é o parâmetro de QoS mais relevante para o tráfego de dados.

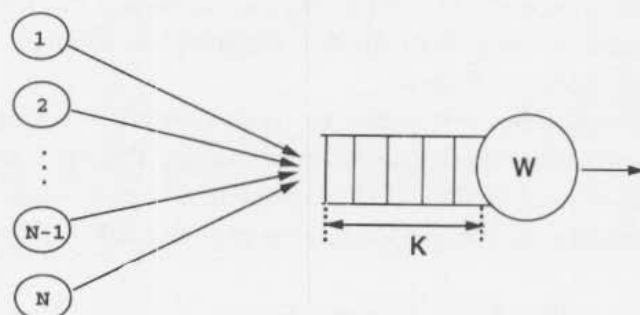


Figura 1: Multiplexador estatístico ATM.

Uma das principais vantagens do ATM é a utilização eficiente dos recursos da rede através da multiplexação estatística. A idéia por trás desse conceito é aproveitar a capacidade ociosa de fontes em rajada (ou seja, fontes que alternam períodos de transmissão na taxa de pico com períodos de silêncio) e fontes VBR (*Variable Bit Rate* — fontes que

transmitem a uma taxa variável), ou seja, os instantes em que estas fontes estejam transmitindo a uma taxa menor que a taxa de pico, para multiplexar um número maior de fontes. Devido ao efeito da multiplexação estatística é possível alocar uma capacidade menor do que a taxa de pico para cada fonte, respeitando a QoS desejada. Note que, neste caso, temos uma CLR que aumenta com o número de fontes multiplexadas. Quando alocamos uma capacidade equivalente à taxa de pico (alocação pelo pico), garantimos que não haverá perda de células para a fonte. Suponha que estejamos multiplexando fontes homogêneas num canal de capacidade  $W$ . Se fizermos alocação pelo pico, poderemos multiplexar até  $N_p = W/B_p$ . Neste caso, garantimos que não há perdas para nenhuma das fontes. Se fizermos agora multiplexação estatística, ou seja, se admitirmos uma taxa de perda total de CLR, o número de fontes multiplexadas  $N(CLR)$  será maior do que  $N_p$ . Assim, podemos definir um ganho devido à utilização da multiplexação estatística, o Ganho de Multiplexação Estatística (*Statistical Multiplexing Gain* — SGM), que é dado por

$$SMG = \frac{N(CLR)}{N_p} \quad (1)$$

Note que o SMG depende dos tipos de fontes que estão sendo multiplexadas, do tamanho do buffer e da QoS solicitada (aqui representada pela CLR).

### 3 Modelos para o Tráfego de Dados

Motivados pelo estudo de interconexão de redes locais através de ATM, Leland e Wilson [LW91] obtiveram medidas do tráfego de redes Ethernet de alta qualidade, i.e., sem perdas e com precisão de  $100\mu s$  na medida do tempo de chegada dos pacotes. Eles fizeram uma análise estatística preliminar dessas medidas e observaram que o tráfego agregado apresentava *explosividade* em diversas escalas de tempo. Em um artigo posterior, Leland et al. [LTWW94] mostraram que os dados obtidos nessas medidas podem ser modelados através de um processo estocástico *auto-similar* ou *fractal*, que apresenta propriedades estatísticas drasticamente diferentes daquelas dos modelos de tráfego empregados tradicionalmente (e.g., Poisson e ON-OFF exponencial).

Recentemente, Willinger et al. [WTSW97], buscando uma explicação física para a auto-similaridade observada no tráfego agregado Ethernet, mostraram que o tráfego das fontes individuais da rede Ethernet (i.e., cada uma das fontes que compõem o agregado) pode ser modelada por uma fonte ON-OFF Pareto, ou seja, uma fonte em que a duração dos períodos de atividade e/ou a duração dos períodos de silêncio é (são) distribuída(s) de acordo com a distribuição de Pareto.

No restante desta seção, descreveremos os modelos para o tráfego de dados agregado e para o tráfego de dados individual usados no trabalho. Para o tráfego agregado usamos o processo de Poisson, o modelo ON-OFF exponencial e o modelo pseudo auto-similar, enquanto que para o tráfego individual usamos os modelos ON-OFF exponencial e Pareto.

#### 3.1 Modelos para o Tráfego Agregado

O processo de Poisson tem sido um dos mais utilizados para modelar a chegada de pacotes ou células em redes de dados. Esse processo tem a vantagem de ser bem entendido e analiticamente tratável. O processo de Poisson é um processo em que o número de eventos que ocorrem em qualquer intervalo de tamanho  $t$  é distribuído de acordo com uma variável aleatória do tipo Poisson, com média  $\lambda t$ . Neste processo, o tempo entre chegadas é distribuído exponencialmente.

Um outro modelo utilizado para o tráfego de dados agregado é o modelo ON-OFF. Uma fonte ON-OFF é uma fonte de tráfego em rajadas, sendo definida como uma fonte que alterna entre períodos ativos de emissão (períodos ON) e períodos inativos (períodos OFF). Durante um período ativo, os pacotes são gerados a uma taxa de pico constante (caracterizando uma rajada), enquanto que no período inativo nenhum pacote é emitido. Um modelo bastante utilizado para uma fonte individual ON-OFF, que inclui voz e vídeo, é uma cadeia de Markov [Soh92]. Ele tem uma vantagem óbvia sobre o processo de Poisson por caracterizar a correlação entre as chegadas. Os parâmetros que caracterizam esse modelo são: a taxa de pico ( $B_p$ ), a taxa média ( $B_m$ ), a explosividade  $b = B_p/B_m$  e o comprimento médio da rajada em número de células ( $L$ ). O modelo ON-OFF exponencial, tradicionalmente usado para o tráfego de dados, tanto individual quanto agregado, possui períodos ON e OFF distribuídos de acordo com a distribuição exponencial, cujas características estão mostradas na tabela 1.

Tabela 1: Distribuição Exponencial

	Parâmetro	$a, a > 0$
	Faixa	$0 \leq x \leq \infty$
	fdp	$f(x) = \frac{1}{a} \exp(-x/a)$
	CDF	$F(x) = 1 - \exp(-x/a)$
	Média	$a$
	Variância	$a^2$
	Geração de número aleatório	$-a \ln(u)$

A análise estatística das amostras de tráfego Ethernet da Bellcore mostrou que o tráfego agregado exibe auto-similaridade, devendo ser modelado por processos estocásticos auto-similares. Esses processos possuem características bastante diversas daquelas dos processos usados tradicionalmente para modelar o tráfego de uma rede local, como por exemplo, o processo de Poisson. A diferença mais importante entre os processos auto-similares e os modelos tradicionais é que os primeiros exibem *dependência de longo alcance*, medida pelo parâmetro de Hurst ( $H$ ), enquanto que os processos tradicionais não exibem dependência ou apresentam apenas dependência de curto alcance. Isso motiva a realização de novos estudos para avaliar o quanto essa diferença influencia no correto dimensionamento das redes. O problema é que a complexidade dos modelos auto-similares dificulta a obtenção de resultados analíticos exatos. Os estudos analíticos de multiplexadores alimentados com fontes auto-similares obtêm resultados aproximados que valem apenas para buffers de tamanho grande [Nor94, Nor95b, DO94, LTG95].

A inexistência de resultados analíticos exatos para avaliação de desempenho com processos estocásticos auto-similares motivaram pesquisas no sentido de obter modelos que reproduzissem, de forma aproximada, as características do tráfego auto-similar. Seguindo essa linha de raciocínio, Robert e Le Boudec [Rob96, RB95, RB97] desenvolveram um modelo de tráfego Markoviano que reproduz a auto-similaridade observada no tráfego de redes Ethernet em uma escala de tempo finita, modelo que chamaram de *pseudo auto-similar*. Na escala (domínio) em que o modelo exibe auto-similaridade, define-se o parâmetro de Hurst *local* ( $H_l$ ).

O processo proposto em [RB95] é um processo de tempo discreto. Seja  $X_t$  uma variável aleatória que representa o número de células que chegam no  $t$ -ésimo *slot*, ou seja, durante o intervalo  $[t-1, t)$ . Assuma que  $X_t$  só pode assumir os valores 0 ou 1. Seja  $Y_t = i$  o estado do modulador  $i, i \in 1, 2, 3, \dots, n$  no instante  $t$ . As chegadas de células são moduladas por uma cadeia de Markov de tempo discreto de  $n$  estados com probabilidades de transição

$a_{ij}(t_1, t_2) = P[Y_{t_2} = j | Y_{t_1} = i]$ . Seja  $\phi_{ij}$  a probabilidade de chegarem  $j$  células dado que o estado do modulador é  $i$ , ou seja,  $\phi_{ij} = P[X_t = j | Y_t = i]$ .

A família de modelos proposta é caracterizada pelas matrizes  $A$  e  $\Lambda$  — com  $\Lambda$  sendo definido como  $\Lambda = \text{diag}(E(X|Y=0), E(X|Y=1), \dots, E(X|Y=n))$  — das equações (2) e (3); com  $\phi_{11} = 1$  e  $\phi_{i1} = 0 \forall i = 2, 3, \dots, n$ . [Rob96, RB96, RB97].

$$A = \begin{bmatrix} 1 - 1/a - 1/a^2 - \dots - 1/a^n & 1/a & 1/a^2 & \dots & 1/a^n \\ q/a & 1 - q/a & 0 & \dots & 0 \\ (q/a)^2 & 0 & 1 - (q/a)^2 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ (q/a)^n & 0 & 0 & \dots & 1 - (q/a)^n \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\Lambda = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Note que a cadeia de Markov do modelo pseudo auto-similar possui um único estado em que há transmissão, o estado 1, e que todos os demais estados só podem fazer transição para eles mesmos ou para o estado 1, como ilustrado na figura 2.

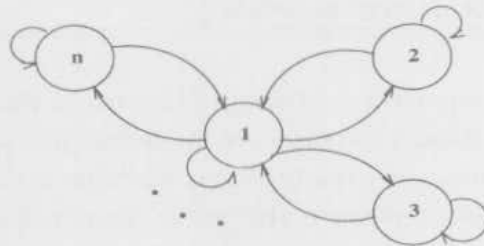


Figura 2: Cadeia de Markov do modelo pseudo auto-similar.

A cadeia de Markov proposta depende de apenas três parâmetros:  $a$ ,  $q$  e o número de estados  $n$ , que podem ser facilmente ajustados a partir da média  $E[X]$  e do parâmetro de Hurst local ( $H_l$ ) desejados, conforme descrito em [RB97, Rob96]. O domínio em que o modelo apresenta auto-similaridade depende do número de estados da cadeia de Markov,  $n$ ; quanto maior  $n$ , maior o domínio. Robert e Le Boudec mostraram que o modelo pseudo auto-similar com 5 estados aproxima muito bem os resultados de probabilidade de perda das amostras de tráfego Ethernet da Bellcore em um multiplexador ATM.

### 3.2 Modelos para o Tráfego Individual

Estudos recentes de Willinger et al. [WTSW97, TWS97, WTSW95], mostraram que a superposição de um número grande de fontes ON-OFF em que os períodos ON e/ou OFF apresentem alta variabilidade produz tráfego auto-similar. Em um primeiro trabalho [WTSW95], os autores assumiram um tipo especial de fonte ON-OFF em que os períodos ON e OFF não alternam de forma estrita, i.e., os períodos ON e OFF são independentes e identicamente distribuídos (i.i.d.), ou seja, um período ON pode ser seguido de outros períodos ON e um período OFF de outros períodos OFF. Mais recentemente, eles consideraram um modelo ON-OFF em que os períodos ON e OFF se alternam estritamente, ou seja, um período ON é sempre seguido de um período OFF e vice-versa

[WTSW97, TWS97]. Este modelo está em concordância com modelos ON-OFF usados na literatura, como o descrito anteriormente nesta seção. Apresentamos aqui um resumo dos resultados mostrados em [WTSW97].

Suponha que superpomos  $N$  fontes ON-OFF homogêneas em que os períodos ON e OFF são estritamente alternados, independentes e possivelmente com distribuições diferentes. Suponha também que o período ON e/ou o período OFF dessas fontes exiba o *Efeito Noé*, ou seja, apresente alta variabilidade. Diz-se que o período ON exibe o Efeito Noé se sua distribuição complementar tiver a forma

$$F_c(x) \sim lx^{-\alpha}L(x), \text{ com } 1 < \alpha < 2,$$

onde  $l$  é uma constante e  $L$  é uma função tal que  $\lim_{x \rightarrow \infty} L(tx)/L(x) = 1$  para todo  $t > 0$ . Um exemplo de distribuição desse tipo é a distribuição de Pareto, cujas características estão mostradas na tabela 2.

Analogamente, o período OFF exibe o Efeito Noé se sua distribuição complementar for do tipo

$$F_c(x) \sim lx^{-\beta}L(x), \text{ com } 1 < \beta < 2$$

A intensidade do Efeito Noé é inversamente proporcional a  $\alpha$  ( $\beta$ ). Assim, distribuições com valores  $\alpha$  ( $\beta$ ) próximos de 1 exibem Efeito Noé mais intenso. Admita ainda que essas fontes sejam i.i.d.. Mostra-se [TWS97] que quando  $N \rightarrow \infty$ , o agregado se comporta estatisticamente como um movimento Browniano fracional (FBM) (processo auto-similar) com parâmetro de Hurst

$$H = \frac{3 - \min(\alpha, \beta)}{2}. \quad (4)$$

O Teorema 2 de [TWS97] apresenta um resultado similar para fontes heterogêneas.

Tabela 2: Distribuição de Pareto Transladada

Parâmetros	$\alpha, \alpha > 0; \theta$
Faixa	$1 \leq x \leq \infty$
fdp	$f(x) = \frac{\alpha}{\theta} \left(\frac{\theta}{x+\theta}\right)^{\alpha+1}$
CDF	$F(x) = 1 - \left(\frac{\theta}{x+\theta}\right)^{\alpha}$
Média	$\frac{\theta}{\alpha-1}, \alpha > 1$
Variância	$\frac{\alpha}{\theta-\alpha} \left( \frac{(1+\theta)^{2-\alpha}}{\alpha-2} - \frac{2\theta(1+\theta)^{1-\alpha}}{\alpha-1} + \frac{\theta^2(1+\theta)^{-\alpha}}{\alpha} \right) - \left( \frac{\theta}{\alpha-1} \right)^2, \alpha > 2$
Geração de número aleatório	$\frac{\theta}{u^{1/\alpha}} - \theta$

Os resultados teóricos descritos foram validados através da análise de medidas de tráfego Ethernet a nível de fontes individuais [WTSW97]. Tanto a análise das medidas quanto os resultados teóricos concluíram que pelo menos uma das distribuições (dos períodos ON e/ou OFF) deve apresentar o Efeito Noé. Assim, de acordo com esses resultados, podemos ter o modelo *ON Pareto*, em que o período ON apresenta distribuição de Pareto enquanto que o período OFF se distribui exponencialmente; o modelo *OFF Pareto*, em que o período OFF se distribui de acordo com Pareto e o período ON se distribui exponencialmente e o modelo *ON-OFF Pareto*, em que ambos os períodos apresentam distribuição de Pareto.

## 4 Multiplexação Estatística do Tráfego Agregado

Nesta seção faremos uma comparação entre os modelos de Poisson, ON-OFF exponencial e pseudo auto-similar de 5 estados em termos dos resultados de probabilidade de perda de células em um multiplexador ATM. Além disso, estudaremos a viabilidade do uso do modelo pseudo auto-similar em estudos analíticos desse tipo.

### 4.1 Avaliação de Desempenho

Estamos interessados em obter a probabilidade de perda de células em um multiplexador estatístico ATM alimentado por uma superposição de fontes de dados. Para fontes de Poisson, usamos o algoritmo Geo/D/1, enquanto que para fontes Markovianas (modelos ON-OFF exponencial ou pseudo auto-similar), usamos o algoritmo MBH (*Matrix Block Hessenberg*). Esses algoritmos assumem modelos de fila em tempo discreto.

O algoritmo Geo/D/1 é usado para obter probabilidades de perda no caso em que o multiplexador ATM é alimentado por fontes homogêneas representadas, cada uma, por uma seqüência de Bernoulli. Esse modelo em tempo discreto é o equivalente de um processo de Poisson em tempo contínuo. O algoritmo Geo/D/1 é de implementação bastante fácil e os resultados são obtidos rapidamente [Bou91].

O MBH é um algoritmo que foi desenvolvido para obter medidas de desempenho — tais como probabilidade de perda e atraso médio de células — em modelos de fila ATM alimentados por fontes Markovianas [Bou91]. A complexidade do algoritmo MBH aumenta linearmente com o tamanho da fila  $K$  e quadraticamente com o número de estados da cadeia de Markov da fonte. O algoritmo admite que o tráfego de entrada seja representado por uma fonte Markoviana.

Estamos interessados em obter a probabilidade de perda de células em uma fila ATM quando esta é alimentada por uma superposição de fontes Markovianas. Quando superpomos  $N$  fontes Markovianas obtemos uma fonte também Markoviana, porém com maior número de estados. Sendo assim, poderemos usar o MBH para obter a probabilidade de perda de células. Em geral, quando superpomos  $N$  fontes Markovianas de  $n$  estados, obtemos uma fonte Markoviana de  $n^N$  estados. As matrizes da fonte resultante são obtidas através de produto/soma de Kronecker. O problema é que o número de estados da fonte resultante da superposição de  $N$  fontes cresce exponencialmente com  $N$ , o que inviabiliza a obtenção de resultados com o MBH mesmo para fontes de 2 estados.

Para fontes homogêneas de 2 estados, mostra-se que o número de estados da fonte resultante da superposição de  $N$  dessas fontes é  $N+1$ , ou seja, aumenta apenas linearmente com  $N$  [Soh92, Oli97]. Para fontes homogêneas de 5 estados, desenvolvemos um método de redução de estados análogo ao caso de 2 estados (ver detalhes em [Oli97]). A fonte resultante da superposição possui, neste caso,  $\binom{N+4}{N}$  estados. A tabela 3 compara o número de estados obtidos através de produto/soma de Kronecker e o número de estados obtidos com redução de estados, no caso de fontes de 5 estados. Observe que a redução de estados é drástica. No entanto, o número de estados da fonte resultante torna difícil o uso do MBH para um número de fontes maior que 8.

N	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Kronecker	25	125	625	3125	15625	$7.8 \times 10^4$	$3.9 \times 10^5$	$1.9 \times 10^6$	$9.8 \times 10^6$
Redução	15	35	70	126	210	330	495	715	1001

Tabela 3: Número de estados resultantes da superposição de fontes de 5 estados.



Os métodos de redução de estados comentados valem apenas quando  $B_p = W$ . No entanto, em diversos casos práticos,  $B_p < W$ . Seja  $R = B_p/W$ . Mostra-se que, em geral, o número de estados é dado por  $\binom{N + nR - 1}{N}$  [Soh92, Oli97]. Ou seja, quando a taxa de pico de cada uma das fontes ( $B_p$ ) é menor que a capacidade do canal ( $W$ ) o problema da explosão de estados é agravado.

## 4.2 Resultados Obtidos

Mostraremos resultados que obtivemos para  $B_p = W$ . Usamos fontes pseudo auto-similares de 5 estados com  $a = 6.7$  e  $q = 0.5764$ , que fornecem, conforme [Rob96, RB97],  $E[X] = 0.05$  e  $H_l = 0.8$ . Para que a comparação seja justa, escolhemos fontes de 2 estados (ON-OFF) com o mesmo valor de  $E[X]$ ; os valores do comprimento médio da rajada ( $a$ ) são os mesmos usados por Robert [Rob96, RB96] em sua comparação da perda em uma fila alimentada por uma única fonte. A fonte de Poisson é caracterizada por um único parâmetro: sua média  $E[X]$ .

As figuras 3, 4, 5 e 6 mostram gráficos da probabilidade de perda de células em função do comprimento da fila quando multiplexamos 2,3,4 e 5 fontes respectivamente. A média  $E[X]$  da fonte de Poisson em cada gráfico é sempre maior que 0.05 e foi escolhida de forma que a perda fosse idêntica à perda produzida pelas fontes de 5 estados, para o menor valor de  $K$ . Observe que em todos os casos a probabilidade de perda de células decai com o comprimento da fila muito mais rapidamente quando as fontes são Poisson que no caso de fontes pseudo auto-similares. Em outras palavras, se usarmos o modelo de Poisson estaremos subestimando as perdas e, por conseguinte, alocando uma quantidade insuficiente de *buffers* e/ou capacidade. Por exemplo, para 3 fontes (figura 4) e uma perda de  $10^{-9}$ , o modelo de Poisson aloca  $K = 40$ . No entanto, para  $K = 40$ , o modelo pseudo auto-similar produz perdas de aproximadamente  $3 \times 10^{-4}$ .

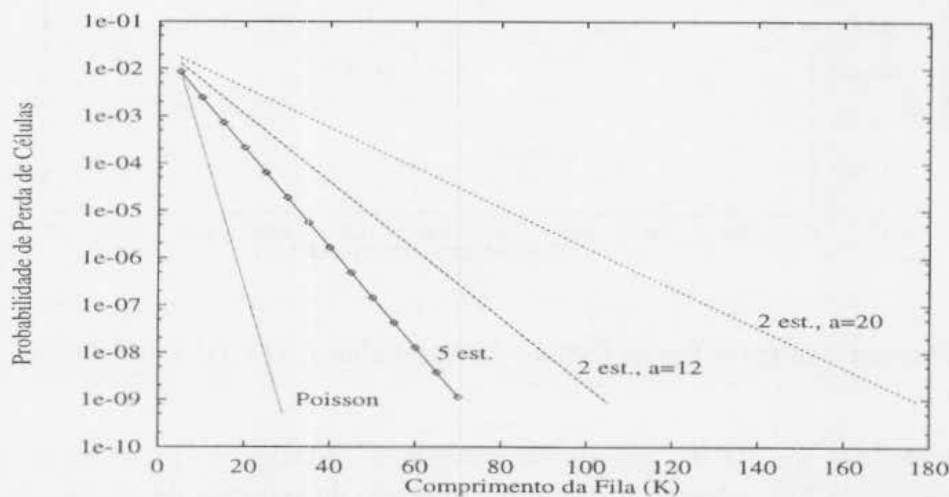


Figura 3: Comparação entre fontes Pseudo Auto-Similares, ON-OFF e Poisson. Agregado de 2 fontes.

O comportamento das fontes ON-OFF é também bastante diferente do das fontes pseudo auto-similares. Para um agregado de 2 fontes, na região mostrada na figura 3, a perda produzida pelas fontes de 5 estados é sempre menor que a das fontes ON-OFF (tanto com o comprimento médio da rajada  $a = 12$ , quanto com  $a = 20$ ). No entanto, quando multiplexamos 3,4 ou 5 fontes, os gráficos respectivos mostram que a probabilidade de

perda decai com  $K$  de forma mais lenta para fontes pseudo auto-similares que para fontes ON-OFF (com  $a = 12$  ou  $a = 20$ ).

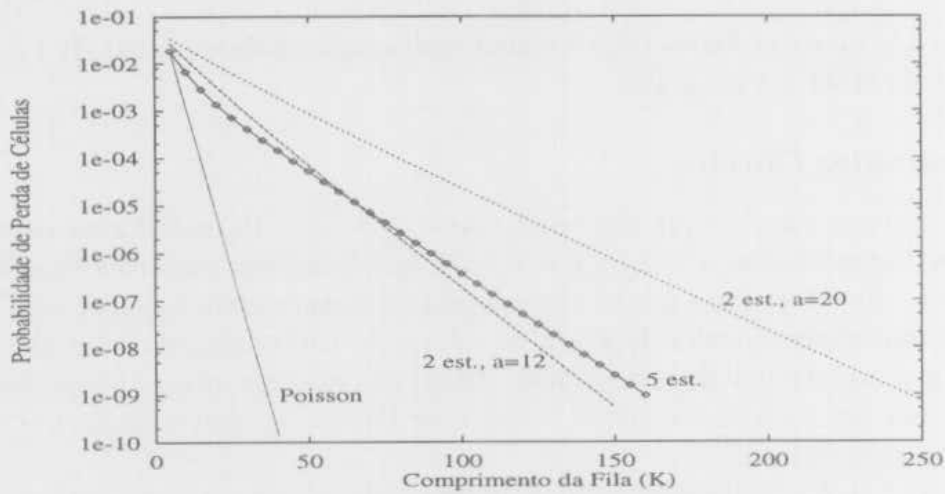


Figura 4: Comparação entre fontes Pseudo Auto-Similares, ON-OFF e Poisson. Agregado de 3 fontes.

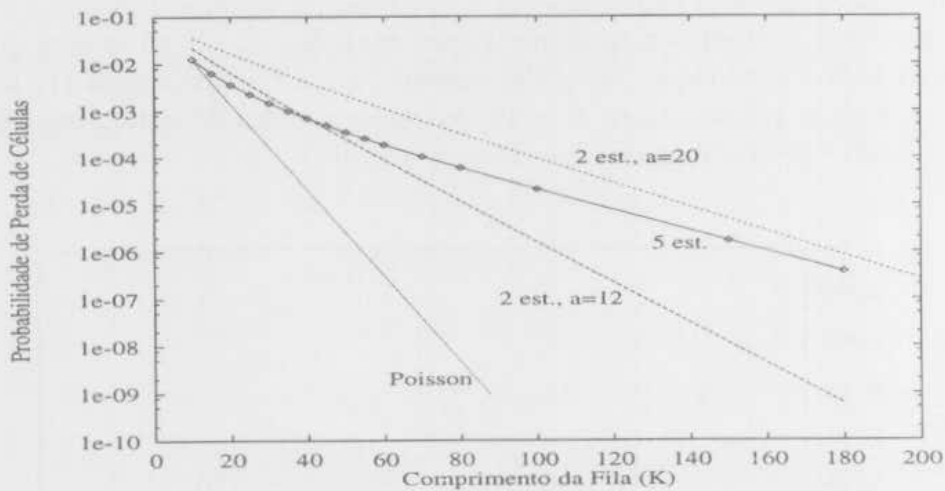


Figura 5: Comparação entre fontes Pseudo Auto-Similares, ON-OFF e Poisson. Agregado de 4 fontes.

A complexidade do MBH depende do número de estados do processo de entrada e do comprimento da fila. Mesmo utilizando o método de redução de estados para fontes homogêneas, o problema da explosão de estados quando as fontes individuais possuem 5 estados persiste e inviabiliza o uso de métodos analíticos para solução de filas com fontes desse tipo, mesmo homogêneas. Para um agregado de 5 fontes de 5 estados homogêneas, não conseguimos obter resultados para  $K > 150$  (figura 6) com o algoritmo MBH. À medida que aumenta o número de fontes agregadas, diminui o valor máximo de  $K$  para o qual conseguimos obter resultados. Os limites do MBH para fontes pseudo auto-similares eliminam a aludida vantagem desse modelo sobre os processos auto-similares (e.g., FGN, FBM), ou seja, a de que temos métodos analíticos que nos fornecem resultados exatos [Rob96, RB96]. É verdade que tais métodos existem (um exemplo é o MBH por nós

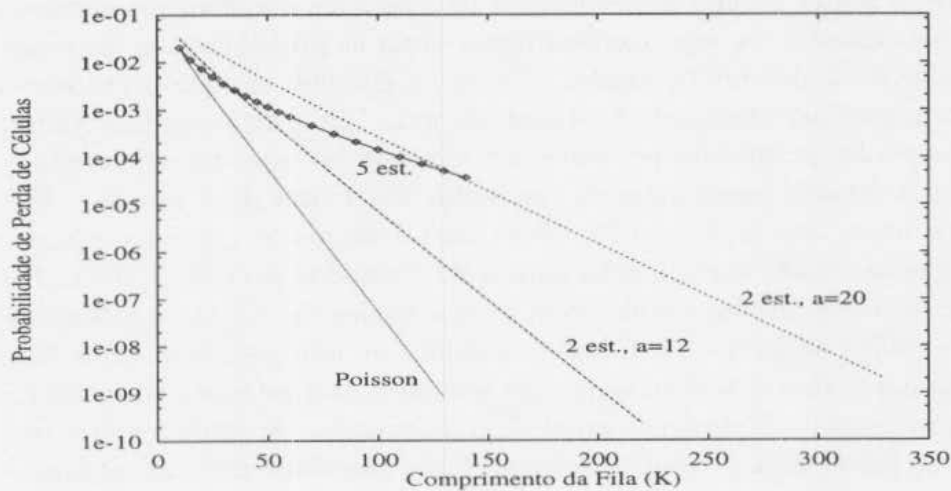


Figura 6: Comparação entre fontes Pseudo Auto-Similares, ON-OFF e Poisson. Agregado de 5 fontes.

utilizado), entretanto seu uso está restrito a um número bastante pequeno de fontes (menos que 10 fontes, ver tabela 3) e comprimentos da fila pequenos. Isso inviabiliza muitos estudos de alocação de recursos com o modelo pseudo auto-similar.

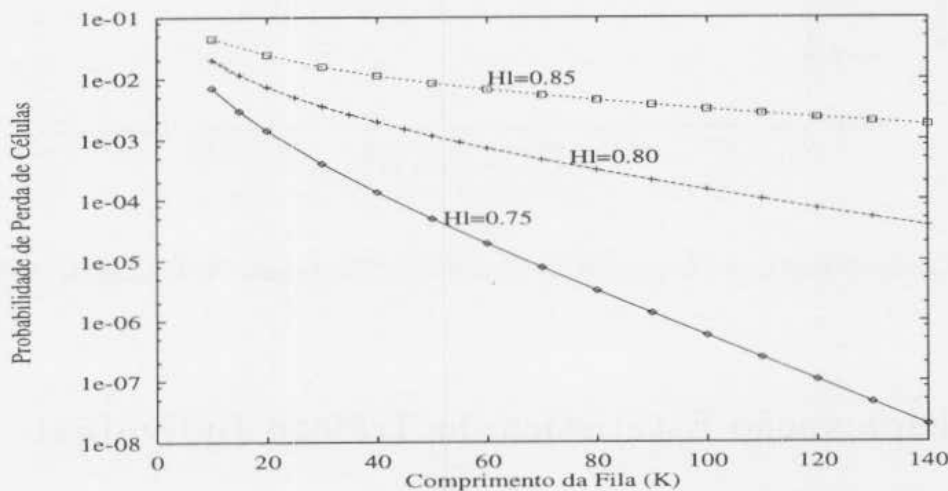


Figura 7: Efeito da variação de  $H_l$  na probabilidade de perda. Agregado de 5 fontes pseudo auto-similares com  $E[X] = 0.05$ .

Apesar das limitações do modelo pseudo auto-similar, vamos utilizá-lo para estudar o efeito da variação do parâmetro de Hurst local ( $H_l$ ) na probabilidade de perda no multiplexador. O parâmetro de Hurst fornece o grau de dependência de longo alcance de um processo estocástico sendo, portanto, um parâmetro muito importante para caracterizar processos auto-similares. Consideraremos fontes pseudo auto-similares de 5 estados em que fixamos a média em  $E[X] = 0.05$  e fazemos  $H_l = 0.75, 0.80$  e  $0.85$ . Os resultados obtidos quando agregamos 5 fontes estão mostrados na figura 7. Observe, dessa figura, que a probabilidade de perda aumenta significativamente com  $H_l$ . Esse resultado está de acordo com resultados obtidos através de estudos com processos auto-similares, tanto de simulação [HDLK95, ENW96] quanto analíticos [Nor95a]. Isso mostra que é imprescindível

considerar o parâmetro de Hurst no dimensionamento de redes ATM.

Se usarmos fontes pseudo auto-similares de 4 estados podemos amenizar o problema da explosão de estados, ou seja, conseguiremos obter as probabilidades de perda para um número maior de fontes multiplexadas. Porém, o domínio em que o processo apresenta correlação é menor para fontes de 4 estados que para fontes de 5 estados. Assim, é preciso comparar as perdas produzidas por esses dois modelos de fontes para determinar o quanto as fontes de 4 estados aproximam os resultados das fontes de 5 estados. Fizemos esse estudo para fontes com  $E[X] = 0.05$ . Neste caso, concluímos que o modelo de 4 estados poderia ser usado como aproximação para o de 5 estados para  $H_1 \leq 0.75$ . Para valores maiores de  $H_1$ , os resultados obtidos com esses modelos são bastante diferentes (ver, por exemplo, o gráfico da figura 8). Como precisamos de um modelo que nos permita fazer estudos com  $0.5 \leq H \leq 0.9$ , concluímos que o modelo de 4 estados não satisfaz. Ademais, apesar do problema da explosão de estados ser amenizado, ele ainda persiste (e.g., quando agregamos 20 fontes de 4 estados temos uma fonte resultante de 1771 estados).

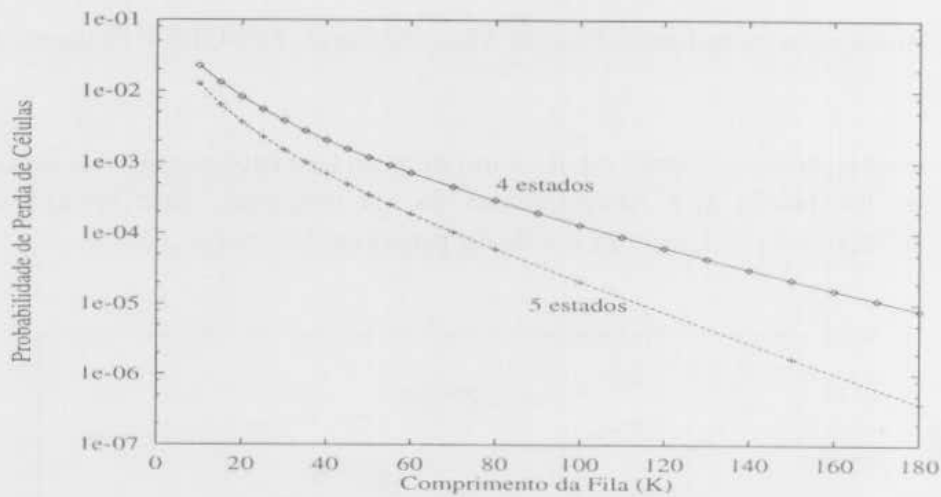


Figura 8: Comparação entre fontes de 4 estados e de 5 estados. Agregado de 4 fontes com  $H_1=0.80$ .

## 5 Multiplexação Estatística do Tráfego Individual

Nesta seção, apresentamos um estudo comparativo entre os modelos de fonte ON-OFF exponencial e ON-OFF Pareto com relação à multiplexação estatística. Certamente a distribuição dos períodos ON e OFF influenciará os resultados de probabilidade de perda e multiplexação estatística. É importante quantificar a sensibilidade dos resultados à distribuição desses períodos e determinar os casos em que o uso da distribuição exponencial produz resultados muito distantes do caso real (distribuição com alta variabilidade, tal como a de Pareto).

### 5.1 Avaliação de Desempenho

Há um resultado analítico recente [BRSV96] que obtém a probabilidade de perda de células num multiplexador estatístico com fontes ON-OFF Pareto; porém ele só é válido assintoticamente, ou seja, quando o tamanho da fila e o número de fontes é muito grande e a utilização do canal é alta. Para contornar esses limites e estudar o problema com

parâmetros mais próximos da realidade, obtivemos nossos resultados através de simulações. O simulador usado está descrito em [Oli97]. Para fontes ON-OFF exponenciais, os resultados foram obtidos usando o UAS (*Uniform Arrival and Service*), que é um método analítico proposto por [AMS82, Tuc88] que obtém resultados com excelente aproximação e de forma bastante eficiente.

## 5.2 Resultados Obtidos

Na seção 3, classificamos os modelos ON-OFF Pareto em três tipos de acordo com a distribuição de seus períodos ON e OFF. Os trabalhos descritos na seção 3 concluíram que qualquer um dentre esses três modelos pode representar de forma fiel o tráfego de dados a nível de fontes individuais, dependendo do tipo de serviço. Assim, é importante realizar um estudo comparativo entre esses modelos e o modelo ON-OFF exponencial com relação às perdas produzidas no multiplexador ATM.

O gráfico da figura 9 mostra a probabilidade de perda de células em um multiplexador ATM em função do tamanho do buffer ( $K$ ), quando multiplexamos 50 fontes homogêneas com  $B_p = 10\text{Mbps}$ ,  $B_m = 2\text{Mbps}$ ,  $b = 5$  e  $L = 100$  células em um canal com  $W = 150\text{Mbps}$ . Para cada curva mostrada é empregado um dos modelos ON-OFF Pareto ou o modelo ON-OFF exponencial. As distribuições de Pareto usadas nos modelos ON-OFF Pareto possuem  $\alpha = 1.6$ . Observe que as perdas produzidas pelos modelos ON-OFF Pareto são sempre maiores que as que se obtêm com o modelo ON-OFF exponencial. Ademais, essas perdas decaem mais lentamente com  $K$  no caso do modelo ON-OFF Pareto que no caso do modelo ON-OFF exponencial. Esses efeitos são maiores no caso do modelo em que ambos os períodos se distribuem de acordo com Pareto; eles diminuem quando somente o período ON se distribui de acordo com Pareto e são ainda menores quando somente o período OFF apresenta essa distribuição.

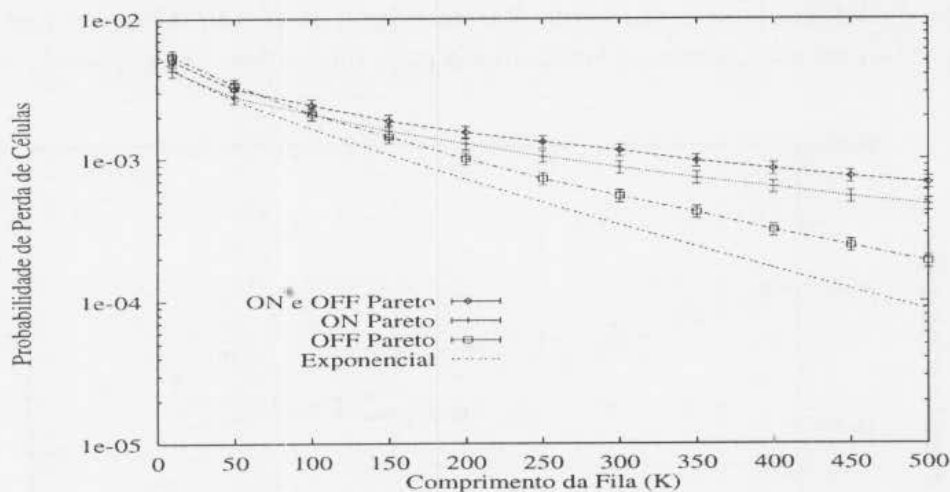


Figura 9: Variação das perdas no multiplexador ATM de acordo com o tipo de modelo de fonte. Multiplexação de 50 fontes.

Uma análise comparativa entre as distribuições de Pareto (tabela 2) e exponencial (tabela 1) nos ajuda a entender o comportamento das perdas no multiplexador estatístico produzida pelos modelos ON-OFF Pareto e ON-OFF exponencial. Note que a distribuição de Pareto tende a gerar valores muito pequenos e muito grandes da variável aleatória com probabilidade muito maior que a distribuição exponencial. As fontes em que somente os períodos OFF têm distribuição de Pareto apresentam perdas maiores que as fontes

exponenciais porque, neste primeiro modelo, são gerados períodos OFF bastante curtos e, quando isso acontece não há tempo suficiente para o buffer se esvaziar e assim, quando a próxima rajada chegar, produzirá maiores perdas. Por outro lado, os períodos OFF muito longos que são gerados não conseguem amenizar o efeito dos períodos OFF muito curtos. Isso acontece porque os períodos OFF que são maiores que o tempo necessário para o buffer se esvaziar têm a mesma importância que períodos da ordem desse tempo, pois o tempo a mais que o tempo para o buffer se esvaziar não contribui para a dinâmica da fila (pois ela já está vazia), ou seja, não ameniza as perdas. No caso das fontes em que somente o período ON possui distribuição de Pareto, as perdas maiores são explicáveis pelo fato de serem geradas rajadas de comprimento muito grande. O efeito da distribuição de Pareto nos períodos ON das fontes contribui muito mais para as perdas que os efeitos dessa distribuição nos períodos OFF. Por isso, os modelos em que somente os períodos ON possuem distribuição de Pareto produzem perdas bem maiores que aqueles em que somente o período OFF está distribuído dessa forma. Quando as fontes possuem ambos os períodos distribuídos conforme Pareto, os efeitos dos períodos ON e OFF se somam e geram perdas ainda maiores que os outros dois modelos.

Continuando nosso estudo, vamos verificar agora qual o comportamento das perdas no multiplexador quando mudamos a explosividade das fontes. Esse tipo de estudo já foi feito e os resultados são conhecidos quando as fontes são ON-OFF exponenciais: se fixarmos  $B_p$  e diminuirmos  $B_m$ , com o conseqüente aumento da explosividade  $b$ , é claro que a probabilidade de perda diminui. Certamente, espera-se esse mesmo tipo de comportamento dos modelos ON-OFF Pareto. O que queremos estudar aqui é como fica a diferença entre o comportamento do modelo ON-OFF Pareto e ON-OFF exponencial quando aumentamos a explosividade. Consideramos fontes com os mesmos parâmetros anteriores, exceto que, agora  $B_m = 1\text{Mbps}$  e  $b = 10$ . Multiplexando  $N = 80$  dessas fontes em um canal de  $150\text{Mbps}$  obtivemos os resultados mostrados no gráfico da figura 10. São mostrados resultados para fontes ON-OFF exponenciais e para fontes ON-OFF Pareto com ambos os períodos distribuídos de acordo com Pareto com  $\alpha, \beta = 1.6$ . Observe que os efeitos discutidos anteriormente permanecem também para fontes com explosividade maior.

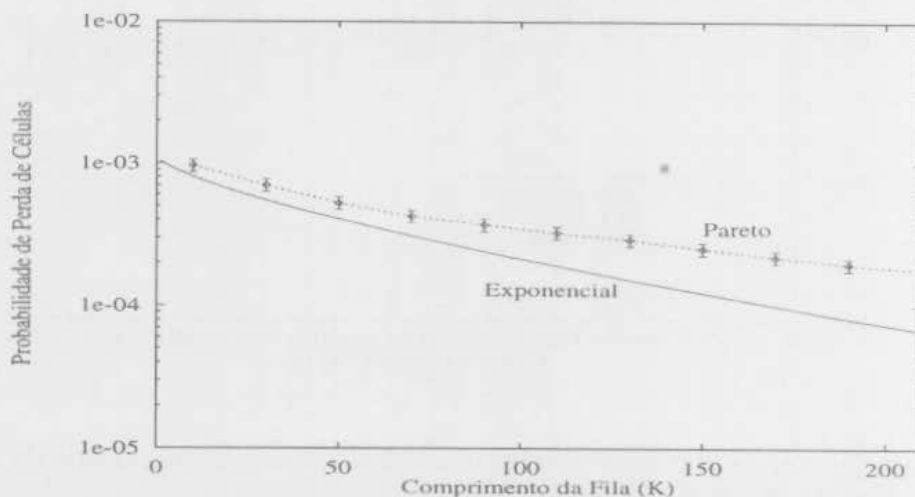


Figura 10: Comparação ON-OFF Pareto ( $\alpha, \beta = 1.6$ ) com ON-OFF exponencial. Multiplexação de 80 fontes com  $B_p = 10\text{Mbps}$ ,  $b = 10$  e  $L = 100$  num canal com  $W = 150\text{Mbps}$ .

Agora vamos diminuir o comprimento médio da rajada, mantendo os demais parâmetros das fontes, ou seja,  $B_p = 10\text{Mbps}$ ,  $B_m = 2\text{Mbps}$ ,  $b = 5$ . O gráfico da figura 11 mostra os resultados obtidos quando fazemos  $L = 50$  células. Mais uma vez, as fontes ON-OFF

Pareto apresentam períodos ON e OFF distribuídos de acordo com Pareto com  $\alpha, \beta = 1.6$ . São multiplexadas 50 fontes. Observe, novamente, que a probabilidade de perda é maior e decai mais lentamente com o buffer quando empregamos o modelo ON-OFF Pareto.

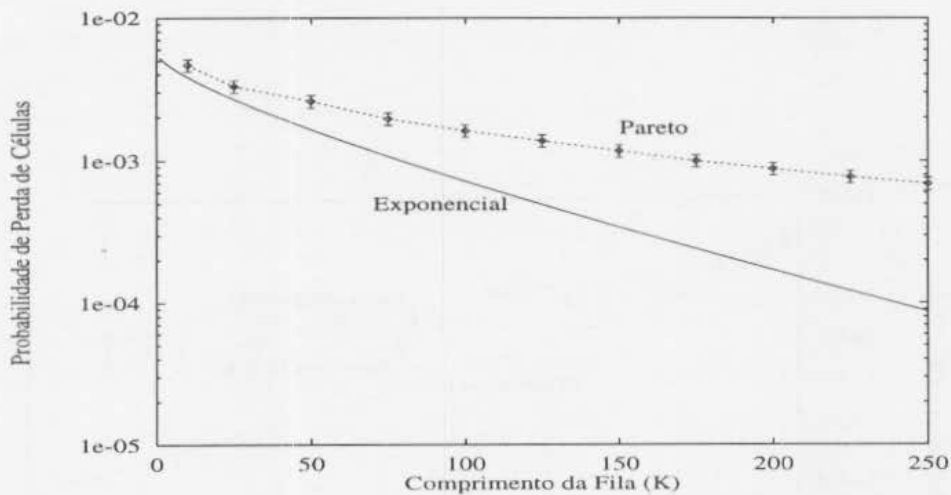


Figura 11: Comparação ON-OFF Pareto ( $\alpha, \beta = 1.6$ ) com ON-OFF exponencial. Multiplexação de 50 fontes com  $B_p = 10\text{Mbps}$ ,  $b = 5$  e  $L = 50$  num canal com  $W = 150\text{Mbps}$ .

Quanto maior a intensidade do Efeito Noé, maior a probabilidade de serem gerados valores muito pequenos e muito grandes da variável aleatória (períodos ON e/ou OFF). A intensidade do Efeito Noé é inversamente proporcional ao parâmetro  $\alpha$  da distribuição de Pareto. O objetivo aqui é estudar a variação das perdas no multiplexador quando aumentamos a intensidade do Efeito Noé. Empregamos um modelo ON-OFF Pareto com ambos os períodos distribuídos de acordo com Pareto para as fontes. Os parâmetros utilizados para as fontes são  $B_p = 10\text{Mbps}$ ,  $B_m = 2\text{Mbps}$ ,  $b = 5$  e  $L = 100$  células. O canal possui capacidade  $W = 150\text{Mbps}$ . Os resultados obtidos quando multiplexamos 50 fontes estão mostrados no gráfico da figura 12. Observe que quando a intensidade do Efeito Noé aumenta, a probabilidade de perda aumenta, afastando-se ainda mais dos valores fornecidos pelo modelo ON-OFF exponencial.

Agora, faremos uma comparação entre os modelos ON-OFF Pareto e ON-OFF exponencial com relação às capacidades alocadas. Para resolver o problema da alocação de capacidades é necessário recorrer a métodos de tentativas e erros, fazendo uma tentativa de alocação e obtendo a probabilidade de perda de células para essa alocação [Mon90, MGF91]. A partir da probabilidade de perda obtida, escolhe-se uma nova tentativa de alocação e o processo se repete até que a probabilidade de perda desejada seja atingida. O gráfico da figura 13 mostra a comparação da capacidade alocada quando usamos os modelos ON-OFF Pareto (com  $\alpha, \beta = 1.6$ ) e ON-OFF exponencial com os mesmos parâmetros, neste caso,  $B_m = 2\text{Mbps}$ ,  $B_p = 10\text{Mbps}$ ,  $L = 100$ . O comprimento do buffer é  $K = 500$  e a perda tolerada é de  $10^{-4}$ . O gráfico mostra que a capacidade alocada é maior quando se emprega o modelo ON-OFF Pareto. Apesar de não termos feito estudos da sensibilidade desses resultados em relação a  $K$ , os resultados de probabilidade de perda de células mostrados anteriormente indicam que a diferença nas capacidades alocadas entre os modelos ON-OFF Pareto e ON-OFF exponencial aumentam com  $K$ .

Nosso objetivo agora é comparar o modelo ON-OFF Pareto com o modelo ON-OFF exponencial em relação ao ganho de multiplexação estatística (eq. 1). Para isso precisamos determinar o número máximo de fontes que podemos multiplexar ( $NF$ ) em um canal com capacidade  $W = 150\text{Mbps}$ . No nosso estudo, as fontes são homogêneas e possuem

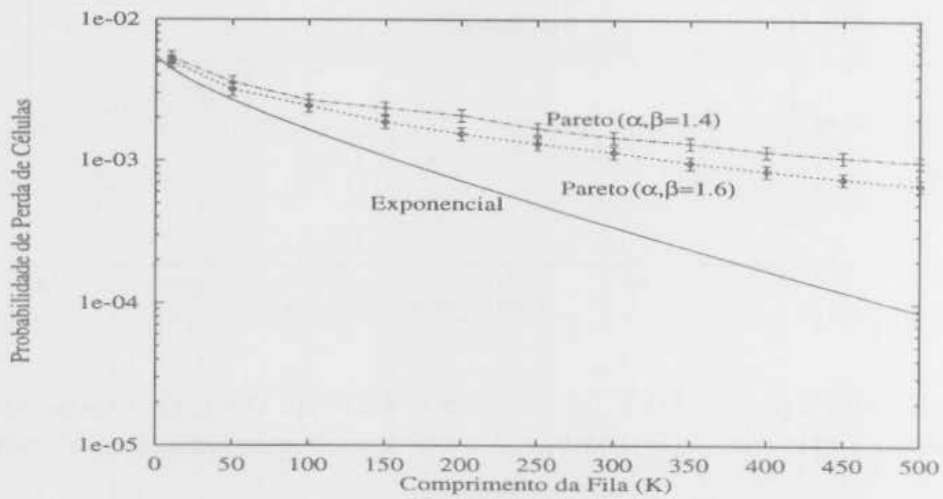


Figura 12: Efeito da variação da intensidade do Efeito Noé na probabilidade de perda de células.

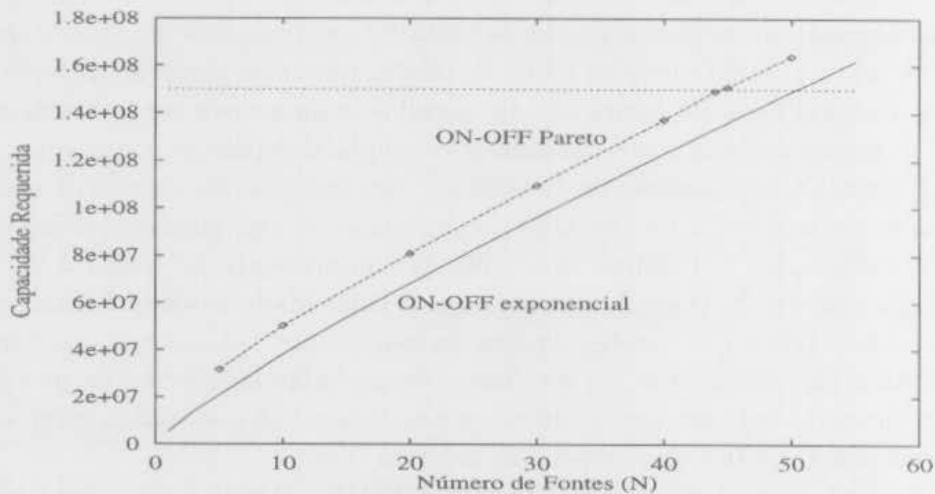


Figura 13: Comparação das alocações com os modelos ON-OFF exponencial e ON-OFF Pareto,  $K=500$ .



os seguintes parâmetros:  $B_m = 2\text{Mbps}$ ,  $B_p = 10\text{Mbps}$  e  $L = 100$ . Neste caso,  $N_p = 150/10 = 15$ ,  $SMG = N(CLR)/15$  e a perda tolerada é de  $10^{-4}$ . Os resultados obtidos estão mostrados na tabela 4. Note que para qualquer tipo de fonte, o número máximo de fontes multiplexadas aumenta com o comprimento do buffer, levando conseqüentemente a um aumento do SMG. Note ainda que o número máximo de fontes multiplexadas — e também o SMG — é menor para os modelos ON-OFF Pareto que no caso do modelo ON-OFF exponencial. Essa diferença aumenta com o aumento da intensidade do Efeito Noé (compare os resultados da tabela 4 para  $\alpha, \beta = 1.6$  e  $\alpha, \beta = 1.4$ ). Ela é menor quando empregamos um modelo em que o período OFF é distribuído de acordo com Pareto e o período ON é exponencial. Para  $K=100$  (valor igual ao comprimento da rajada), os resultados obtidos com modelos ON-OFF exponencial e ON-OFF Pareto são bastante próximos. Todavia, as diferenças se acentuam com o aumento de  $K$ .

<i>Tipo de Fonte</i>	$K = 100$	$K = 500$	$K=1000$
Exponencial	NF=41	NF=50	NF=56
	SMG=2.73	SMG=3.33	SMG=3.73
ON exponencial, OFF Pareto com $\beta = 1.6$	NF=40	NF=48	NF=53
	SMG=2.67	SMG=3.20	SMG=3.53
ON-OFF Pareto com $\alpha, \beta = 1.6$	NF=39	NF=44	NF=47
	SMG=2.60	SMG=2.93	SMG=3.13
ON-OFF Pareto com $\alpha, \beta = 1.4$	NF=39	NF=43	NF=45
	SMG=2.60	SMG=2.87	SMG=3.00

Tabela 4: Número máximo de fontes multiplexadas (NF) e ganho de multiplexação estatística (SMG) para uma perda de  $10^{-4}$ , em função do tamanho do buffer ( $K$ ).

## 6 Conclusões e Trabalhos Futuros

Neste trabalho estudamos a multiplexação estatística considerando modelos para o tráfego de dados agregado e para o tráfego individual. Fizemos um estudo comparativo entre os modelos tradicionais e os novos modelos propostos na literatura para esses tipos de tráfego.

No caso do tráfego agregado, os resultados obtidos mostraram que o modelo de Poisson subestima gravemente a probabilidade de perda com relação ao modelo pseudo auto-similar de 5 estados. O comportamento do modelo pseudo auto-similar é bastante diferente também do modelo ON-OFF exponencial. O decaimento da probabilidade de perda de células com o aumento do tamanho do buffer é mais lento no caso das fontes pseudo auto-similares. Assim, dependendo dos parâmetros das fontes, por vezes o modelo pseudo auto-similar produz perdas menores que o ON-OFF para buffers pequenos, porém esse comportamento se inverte para grandes buffers. Mostramos também que a probabilidade de perda de células do modelo pseudo auto-similar aumenta com o parâmetro de Hurst local ( $H_l$ ), sendo bastante sensível a mudanças neste parâmetro.

O estudo mostrou também que o uso do modelo pseudo auto-similar sofre sérias limitações no número máximo de fontes e tamanho máximo do buffer que podem ser usados. Esse problema se agrava se considerarmos taxas de pico inferiores à capacidade do canal. Dependendo da razão entre a taxa de pico das fontes e a capacidade do canal, não se consegue obter resultados com o MBH nem mesmo para um agregado de 2 fontes!

O modelo Markoviano pseudo auto-similar foi introduzido como uma alternativa para a questão da falta de métodos analíticos exatos para modelos auto-similares. Por ser

um modelo Markoviano, o modelo pseudo auto-similar aproveita os métodos analíticos desenvolvidos para solucionar diversos problemas de avaliação de desempenho de redes para modelos desse tipo. O problema é que por ser um modelo Markoviano complexo, com 5 estados, ele apresentou sérios limites na obtenção de resultados de multiplexação estatística devidos à explosão de estados. Estes limites tornam o modelo pouco aplicável na prática. Como, para fontes de dados, as probabilidades de perda que se deseja estimar são da ordem de  $10^{-4}$ , esse problema pode ser contornado usando simulação. Neste caso é melhor usar os modelos auto-similares — como o FBM e o F-ARIMA — que traduzem o comportamento do tráfego agregado de forma mais fiel.

No caso do tráfego individual, os resultados foram obtidos para fontes homogêneas. Mostramos que o modelo ON-OFF Pareto produz perdas maiores que o modelo ON-OFF exponencial; além disso, as perdas do modelo ON-OFF Pareto decaem de forma mais lenta com o tamanho do buffer que no modelo ON-OFF exponencial. Esses efeitos são mais fortes para modelos ON-OFF Pareto em que ambos os períodos possuem essa distribuição. Eles diminuem um pouco quando somente o período ON possui distribuição de Pareto e diminuem mais ainda quando essa distribuição está presente somente no período OFF (em ambos os casos o outro período é exponencial). Mostramos também que esses efeitos aumentam com a intensidade do Efeito Noé, i.e., com o aumento da variabilidade das distribuições dos períodos ON e/ou OFF.

O estudo mostrou também que o ganho de multiplexação estatística com fontes ON-OFF Pareto é menor, quando comparado com fontes ON-OFF exponenciais. Essa diferença é maior quando temos fontes em que ambos os períodos possuem distribuição de Pareto. Ela diminui para fontes em que somente o período ON apresenta essa distribuição e é ainda menor quando isso só acontece com o período OFF. Mais uma vez, a diferença de resultados em comparação com as fontes ON-OFF exponenciais aumenta com a intensidade do Efeito Noé. As diferenças no ganho de multiplexação estatística entre os modelos ON-OFF Pareto e ON-OFF exponencial só são significativas para buffers maiores que o comprimento médio da rajada das fontes; e aumentam com o aumento do tamanho do buffer.

O simulador implementado neste trabalho pode ser usado para trabalhos futuros com o modelo ON-OFF Pareto, entre eles, sugerimos: realizar estudos com uma gama mais ampla de parâmetros das fontes; fazer estudos com fontes heterogêneas (o que requer uma pequena alteração no simulador) e comparar os resultados analíticos assintóticos [BRSV96] com os resultados de simulação, com o objetivo de determinar do número de fontes, utilização do canal e comprimento do buffer para os quais os resultados analíticos aproximam os resultados de simulação de maneira satisfatória.

## Agradecimento

Agradecemos ao CNPq pelo apoio financeiro.

## Referências

- [AB97] I. F. Akyildiz e K. L. Berhardt. ATM Local Area Networks: A Survey of Requirements, Architectures, and Standards. *IEEE Communications Magazine*, v. 35, n. 7, p. 72–80, Julho 1997.
- [AMS82] D. Anick, D. Mitra, e M. M. Sondhi. Stochastic Theory of a Data-Handling System with Multiple Sources. *The Bell System Technical Journal*, v. 61, n. 8, p. 1871–1894, Outubro 1982.

- [Atk94] R. Atkinson. Default IP MTU for Use over ATM AAL5. RFC-1626, Maio 1994.
- [Bou91] Jean-Yves Le Boudec. An Efficient Solution Method for Markov Models of ATM Links with Loss Priorities. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, v. 9, n. 3, p. 408–417, Abril 1991.
- [BRV96] F. Bricchet, J. Roberts, A. Simonian, e D. Veitch. Heavy Traffic Analysis of a Storage Model with Long Range Dependent On/Off Sources. *Queueing Systems*, v. 23, p. 197–215, Agosto 1996.
- [CGST94] H. J. Chao, D. Ghosal, D. Saha, e S. K. Tripathi. IP on ATM Local Area Networks. *IEEE Comm. Magazine*, v. 32, n. 8, p. 52–59, Agosto 1994.
- [DO94] N. G. Duffield e N. O'Connell. Large Deviations and Overflow Probabilities for the General Single-Server Queue, with Applications. Research report dias-apg-93-30, Dublin Institute for Advanced Studies, 10 Burlington Road, Dublin 4, Julho 1994.
- [ENW96] A. Erramilli, O. Narayan, e W. Willinger. Experimental Queuing Analysis with Long-Range Dependent Packet Traffic. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, v. 4, n. 2, p. 209–223, Abril 1996.
- [HDLK95] C. Huang, M. Devetsikiotis, I. Lambadaris, e A. R. Kaye. Modeling and Simulation of Self-Similar Variable Bit Rate Compressed Video: A Unified Approach. Em *SIGCOMM'95*, p. 114–125, 1995.
- [Hei93] J. Heinanen. Multiprotocol Encapsulation over ATM Adaptation Layer 5. RFC-1483, Julho 1993.
- [Kav95] Nail Kavak. Data Communication in ATM Networks. *IEEE Network*, v. 9, n. 3, p. 28–37, Maio 1995.
- [Lau94] M. Laubach. Classical IP and ARP over ATM. RFC-1577, Janeiro 1994.
- [LH96] M. Laubach e J. Halpern. Classical IP over ATM. Internet Draft, Junho 1996.
- [LTG95] N. Likhanov, B. Tsybakov, e N. D. Georganas. Analysis of an ATM Buffer with Self-Similar("Fractal") Input Traffic. Em *Proc. IEEE INFOCOM'95*, Boston, Abril 1995.
- [LTWW94] Will E. Leland, Murad S. Taqqu, Walter Willinger, e Daniel V. Wilson. On the Self-Similar Nature of Ethernet Traffic (Extended Version). *IEEE/ACM Transactions on Networking*, v. 2, n. 1, p. 1–15, Fevereiro 1994.
- [LW91] W. E. Leland e D. V. Wilson. High Time-Resolution Measurement and Analysis of LAN Traffic: Implications for LAN Interconnection. Em *Proc. IEEE INFOCOM'91*, p. 1360–1366, Abril 1991.
- [MGF91] J. A. Suruagy Monteiro, Mario Gerla, e Luigi Fratta. Statistical Multiplexing in ATM Networks. *Performance Evaluation*, v. 12, n. 3, p. 157–167, 1991.
- [Mon90] J. A. Suruagy Monteiro. *Bandwidth Allocation in Broadband Integrated Services Digital Networks*. Tese de Doutorado, University of California, Los Angeles, Los Angeles, CA, 1990.

- [Nor94] I. Norros. A Storage Model with Self-Similar Input. *Queueing Systems*, v. 16, p. 387–396, 1994.
- [Nor95a] I. Norros. The Management of Large Flows of Connectionless Traffic on the Basis of Self-Similar Modeling. Em *Proceedings of ICC'95*, Seattle, WA, Setembro 1995.
- [Nor95b] I. Norros. On the Use of Fractional Brownian Motion in the Theory of Connectionless Networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, v. 13, n. 6, p. 953–962, Agosto 1995.
- [Oli97] Adriano L. I. Oliveira. Modelos de Tráfego para a Multiplexação Estatística do Tráfego de Dados em Redes ATM. Tese de Mestrado, Departamento de Informática — Universidade Federal de Pernambuco, 1997.
- [RB95] Stephan Robert e Jean-Yves Le Boudec. A Markov Modulated Process for Self-Similar Traffic. Em *Internationales Begegnungs und Forschungszentrum fuer Informatik*, p. 24–29, Schloss Dagstuhl, Saarbruecken, Germany, Setembro 1995.
- [RB96] S. Robert e J.-Y. Le Boudec. On a Markov Modulated Chain Exhibiting Self-Similarities over Finite Timescale. *Performance Evaluation*, v. 27 & 28, p. 159–173, 1996.
- [RB97] S. Robert e J.-Y. Le Boudec. New Models for Pseudo Self-Similar Traffic. *Performance Evaluation*, v. 30, n. 1 & 2, p. 57–68, Julho 1997.
- [Rob96] Stephan Robert. *Modélisation Markovienne du Trafic dans les Réseaux de Communication*. Tese de Doutorado, Section de Système de Communication - École Polytechnique Federale de Lausanne, 1996.
- [Soh92] K. Sohraby. On the Asymptotic Behavior of Heterogeneous Statistical Multiplexer With Applications. Em *INFOCOM'92*, p. 839–847, 1992.
- [TJB<sup>+</sup>95] H. L. Truong, W. W. Ellington Jr., J.-Y. Le Boudec, A. X. Meier, e J. W. Pace. LAN Emulation on an ATM Network. *IEEE Communications Magazine*, v. 33, n. 5, p. 70–84, Maio 1995.
- [Tuc88] Roger C. F. Tucker. Accurate Method for Analysis of a Packet-Speech Multiplexer with Limited Delay. *IEEE Transactions on Communications*, v. 36, n. 4, p. 479–483, Abril 1988.
- [TWS97] Murad S. Taqqu, W. Willinger, e R. Sherman. Proof of a Fundamental Result in Self-Similar Traffic Modelling. *Computer Communications Review*, v. 27, n. 2, p. 5–23, Abril 1997.
- [WTSW95] Walter Willinger, M. S. Taqqu, R. Sherman, e D. V. Wilson. Self-Similarity Through High-Variability: Statistical Analysis of Ethernet LAN Traffic at the Source Level. Em *SIGCOMM'95*, p. 100–113, Cambridge, MA USA, 1995.
- [WTSW97] Walter Willinger, M. S. Taqqu, R. Sherman, e D. V. Wilson. Self-Similarity Through High-Variability: Statistical Analysis of Ethernet LAN Traffic at the Source Level. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, v. 5, n. 1, p. 71–86, Fevereiro 1997.