

Escalonamento GPS baseado na Regularidade Local do Tráfego Internet

Christian Jorge, Flávio Henrique Teles Vieira e Lee Luan Ling

Resumo—Neste artigo verifica-se o uso do expoente de Hölder pontual como indicador da regularidade local do tráfego Internet. Para tal, propomos um método de estimação deste expoente por meio do decaimento dos coeficientes wavelets em janelas de tempo. Utilizando este método, propomos uma nova estratégia de escalonamento baseada no *Generalized Processor Sharing* (GPS) para alocação dinâmica de taxa aos fluxos de uma rede.

Palavras-Chave—Tráfego, Redes, Multifractais, Wavelets, Expoente de Hölder Pontual, Escalonamento, GPS.

Abstract—This paper presents the use of the pointwise Hölder exponent to indicate the local regularity of Internet traffic. We propose a method to estimate this exponent using the wavelet coefficients decay of each time window. We also propose a new scheduling strategy based on the *Generalized Processor Sharing* (GPS) to dynamically allocate network flow rate.

Index Terms—Traffic, Network, Multifractals, Wavelets, Pointwise Hölder Exponent, Scheduling, GPS.

I. INTRODUÇÃO

A Internet atual está evoluindo do serviço de melhor-esforço na transmissão de informação para um paradigma com várias classes de serviços existentes, cada qual com seus requerimentos de qualidade de serviço. Prover tais requisitos de qualidade de serviço tem se tornado não só uma necessidade, mas um desafio na modelagem do tráfego de redes de computadores modernas.

Estudos de um passado recente, abordavam o tráfego como um processo auto-similar ou monofractal [1][2]. Atualmente, tal abordagem ainda é utilizada, mas cede cada vez mais espaço à abordagem multifractal [3].

Em geral, utilizam-se escalas maiores que 100 ms para a modelagem do tráfego como um processo auto-similar [4]. Em tais escalas ele é visto como uma agregação de várias conexões individuais, com alta variabilidade na duração ou na quantidade de informação e governado por um indicador constante de escala e regularidade: o parâmetro de Hurst. Esta abordagem monofractal é importante no projeto de rede e no gerenciamento.

Christian Jorge, Flávio Henrique Teles Vieira e Lee Luan Ling, Departamento de Comunicações (DECOM), Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação (FEEC), Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brasil, E-mails: christian@fee.unicamp.br, flavio@decom.fee.unicamp.br, lee@decom.fee.unicamp.br.

Em determinadas escalas de tempo, em geral abaixo ou igual a 100 ms, o tráfego é constituído por leis de escala mais complexas do que supunham os modelos auto-similares [5]. Neste cenário, é conveniente caracterizá-lo como um processo multiplicativo, por meio da abordagem multifractal, ao invés de uma caracterização aditiva. As causas de tudo isso, são regras e processos do protocolo TCP/IP que fragmentam unidades de informação de uma camada de rede, em unidades menores na próxima camada. Nesse contexto, insere-se o expoente de Hölder pontual como um indicador local e mais adequado de regularidade. Este expoente indica a intensidade das rajadas do tráfego, e assim como o parâmetro de Hurst, pode ser caracterizado via transformada wavelet, devido à invariância à dilatação e translação de processos auto-similares e multifractais.

Nesse artigo, mostra-se que utilizando o expoente de Hölder pontual como caracterizador das condições locais de um fluxo de dados, em termos nível de rajada, pelo *Generalized Processor Sharing* (GPS) como disciplina de escalonamento em um roteador ou *switch*, obtemos uma diminuição da perda de dados e um melhor aproveitamento da taxa de transmissão na multiplexação. Isto ocorre por meio de uma alocação mais justa e coerente da taxa de transmissão a cada fluxo.

O resto do artigo se organiza conforme descrito a seguir. Na seção II, iremos caracterizar a regularidade local de uma função utilizando a transformada wavelet. Na seção III, serão apresentados algoritmos para a estimação em janelas de um indicador dessa regularidade local. Na seção IV, aplicaremos essa estimação no escalonamento de fluxos de dados. Finalmente na seção V, apresentaremos as conclusões obtidas.

II. CARACTERIZAÇÃO WAVELET DA REGULARIDADE LOCAL

A. Análise Wavelet

A transformada wavelet é um excelente método para análise do comportamento local de funções [6]. Ela atua por meio de um produto-convolução da função a ser analisada, com a wavelet-mãe $\psi(x)$, em uma escala a e transladada a um ponto b , gerando o coeficiente wavelet $d_{a,b}$ dado por:

$$d_{a,b} = \frac{1}{a} \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \psi\left(\frac{x-b}{a}\right) dx \quad \text{com } a, b \in \mathbb{R} \text{ e } a > 0 \quad (1)$$

O uso do fator a^{-1} é justificado para obtermos $\|\psi_{a,b}\|_1 = \|\psi\|_1$, onde $\|\cdot\|_1$ é a norma 1.

Essa transformada pode ser interpretada como um operador diferencial multi-escala de ordem N devido à propriedade dos momentos de desaparecimento (*vanishing moments*) da wavelet, que satisfazem [7]:

$$\int_{-\infty}^{\infty} x^i \psi(x) dx = 0, \text{ para } i=0, \dots, N-1 \quad (2)$$

B. Expoente de Hölder Pontual

O expoente de Hölder pontual é capaz de descrever o grau de uma singularidade, o que é interessante para a caracterização das rajadas de dados em redes de computadores.

Definição 1 (Expoente de Hölder pontual) : Seja α um número real e K uma constante, ambos estritamente positivos, e $x_0 \in R$. A função $f : R \rightarrow R$ é $C^\alpha(x_0)$ se existe um polinômio P_n , de grau $n < \alpha$ tal que :

$$|f(x) - P_n(x - x_0)| < K |x - x_0|^\alpha \quad (3)$$

O expoente de Hölder pontual da função f em x_0 será definido como:

$$h = \sup\{\alpha > 0 \mid f \in C^\alpha(x_0)\} \quad (4)$$

Note que o polinômio P_n pode ser encontrado mesmo que o desenvolvimento em série de Taylor de f ao redor de x_0 não exista.

C. Tipos de Singularidades

Existem diferentes funções com um mesmo expoente de Hölder num determinado ponto, mas com comportamentos completamente distintos ao redor desse mesmo ponto. Isso é devido ao tipo de singularidade que a função possui. Aqui podemos destacar dois tipos [7]:

1. Singularidades não-oscilantes (*cusps*)

Em geral são do tipo $f_h(x) = |x - x_0|^h$ e são regulares o suficiente para que, dada uma função f com expoente de Hölder no ponto x_0 , sua derivada possua expoente de Hölder $h-1$ e sua integral possua expoente de Hölder $h+1$, no ponto x_0 .

2. Singularidades oscilantes (*chirps*)

Para funções do tipo $g_{h,\beta}(x) = |x - x_0|^h \text{sen}\left(\frac{1}{|x - x_0|^\beta}\right)$,

que oscilam infinitamente ao redor de x_0 , a regra da integral, apresentada para singularidades não-oscilantes, não procede. Essas funções sempre terão seus expoentes de Hölder h em x_0 , independente de β , mas sua integral possuirá expoente de Hölder pontual igual a $(h+1+\beta)$ em x_0 , devido a efeitos de cancelamento que levam a uma suavidade maior que as singularidades não-oscilantes.

Assim, uma completa descrição do comportamento local de uma função pode ser obtida com a informação do expoente de Hölder pontual em conjunto com o expoente de oscilação β .

D. Decaimento dos Coeficientes Wavelets

Conforme relatado em [7][8], o expoente de Hölder de uma função no ponto x_0 , pode ser aproximado usando $|d_{a,b}| \sim a^{-h}$, com os coeficientes wavelets máximos absolutos $|d_{a,b}|_{b \in Z}$ imersos num cone do tipo $|x - x_0| \leq Ka$. Porém, esse tipo de análise só é condizente com singularidades não-oscilantes.

No tráfego de redes, devido à alta irregularidade presente, devemos levar em consideração também as singularidades oscilantes. Nesse caso, os coeficientes wavelets máximos absolutos estão imersos num cone parabólico mais largo que o citado anteriormente, cuja equação é dada por $|x - x_0|^{1+\beta} \leq Ka$.

Dessa forma, para uma caracterização correta do comportamento local de uma função, devemos levar em consideração não apenas a amplitude dos coeficientes wavelets, mas também sua localização no tempo. Assim, utilizamos a seguinte desigualdade [9]:

$$|d_{a,b}| \leq K(a + |x - x_0|)^h \quad (5)$$

Com base nisso, Seuret et al.[10] propuseram um algoritmo para estimação dos expoentes de Hölder pontuais tanto para singularidades oscilantes quanto não-oscilantes, que será apresentado na seção III, a seguir.

III. ESTIMAÇÃO DO EXPOENTE DE HÖLDER PONTUAL

A. Estimação com Singularidades Oscilantes e Não-oscilantes

Nosso objetivo é, a partir de amostras de uma função de comprimento finito, como tráfego de redes, calcular a regularidade local para cada amostra, em janelas de tempo pré-determinadas. Como esse conjunto de amostras é finito, o uso de uma transformada wavelet discreta, mas não-dizimada (redundante) é recomendada para a obtenção de estimações mais estáveis. As amostras serão referenciadas agora como k e as escalas como 2^j , com um j pequeno significando uma escala menor e um j grande uma escala maior, e $k, j \in N$.

A estimação do expoente de Hölder pontual para cada amostra k_0 se dá inicialmente construindo-se uma “nuvem” de pontos $(x_j(k), y_j(k))$ onde:

$$x(j, k) = \log_2(2^j + |k - k_0|) \quad (6)$$

$$y(j, k) = \log_2(|d_{j,k}|) \quad (7)$$

O expoente de Hölder de k_0 corresponderá ao coeficiente angular da reta que se encaixa tão precisamente quanto possível no topo dessa “nuvem” [10]. Para diminuir o número de pontos, usamos a restrição $3 \leq x(j, k) \leq \log_2(2^n) - 2$, sendo 2^n o número de amostras utilizadas. Isto nos permite

considerar os coeficientes wavelets máximos absolutos, numa extensão suficiente de expoentes de oscilação β .

Como exemplo, seja o sinal 1, composto por uma singularidade não-oscilante, cuja função é dada por $|x|^{0.7}$ e o sinal 2, composto por uma singularidade oscilante cuja função é dada por $|x|^{0.7} \text{sen}\left(\frac{1}{|x|^{1.2}}\right)$. Ambos possuem, para

$k_0 = 0$, expoente de Hölder igual a 0,7. As Figuras 1 e 2 mostram os sinais 1 e 2, suas respectivas “nuvem de pontos” e a reta que toca seu topo.

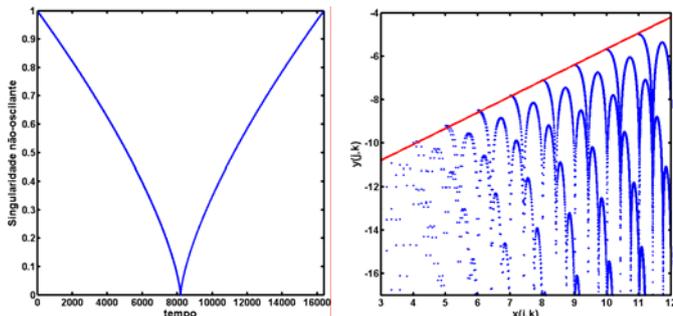


Fig.1. Esquerda: função $|x|^{0.7}$; Direita: “nuvem de pontos” associada ao ponto de singularidade não-oscilante da função. O coeficiente angular da reta da figura à direita é a estimativa do expoente de Hölder pontual.

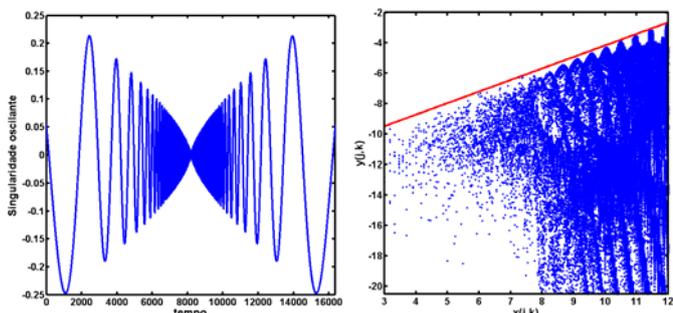


Fig.2. Esquerda: função $|x|^{0.7} \text{sen}(1/|x|^{1.2})$; Direita: “nuvem de pontos” associada ao ponto de singularidade oscilante da função. O coeficiente angular da reta da figura à direita é a estimativa do expoente de Hölder pontual.

B. Estimação de Hölder Pontual para Tráfego Internet

Agora consideraremos séries de tráfego como amostras dos traços de tráfego Internet dec1-pkt.TCP e lb15-pkt.TCP agregadas numa escala de tempo de 100 ms [12]. Assim, espera-se (e isto será verificado a seguir), uma intensa irregularidade, principalmente em termos de rajadas. Por esse motivo, devemos levar em consideração uma estimativa mais cuidadosa, considerando inclusive oscilações, como já foi dito.

Para as séries de tráfego foram consideradas 2^{14} amostras e escalas 2^j , com $1 \leq j \leq 12, j \in \mathbb{N}$. Com esse número de escalas, garantimos uma quantidade de pontos suficientes, sem que haja fenômeno de periodização em escalas maiores, que tendenciam resultados. A wavelet utilizada foi a *Morlet*.

Por meio das Figuras 3 e 4, podemos verificar a predominância de expoentes de Hölder pontuais menores que 0,5 e a diminuição do valor deste expoente em instantes de tempo onde há aumento acentuado do tráfego. Isso demonstra a intensa irregularidade do tráfego e o caráter de rajadas (*burstiness*) em pequenas escalas de tempo.

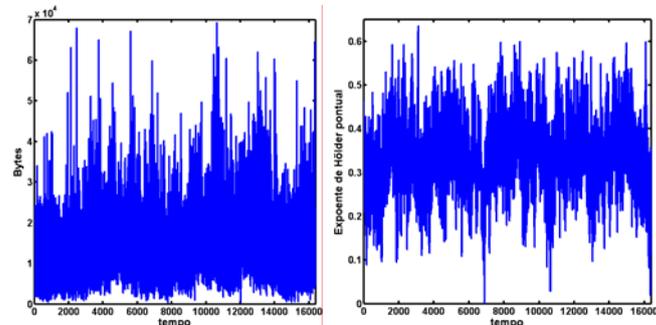


Fig.3. Esquerda: amostras de tráfego da série dec1; Direita: Expoentes de Hölder pontuais referentes às amostras citadas.

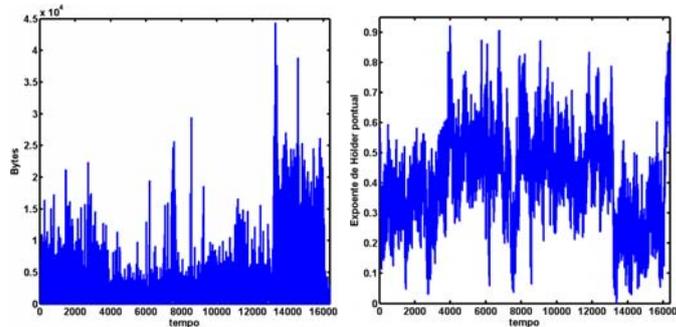


Fig.4. Esquerda: amostras de tráfego da série lb15; Direita: Expoentes de Hölder pontuais referentes às amostras citadas

C. Expoente de Hölder Pontual em Janelas de Tempo

Até aqui, consideramos a estimativa do expoente de Hölder pontual de cada amostra, levando-se em consideração todas as amostras disponíveis de tráfego. Propõe-se nesse trabalho verificar o erro obtido com a diminuição do número de amostras de tráfego na estimativa do expoente de Hölder. A justificativa é diminuir a quantidade de informação a ser processada. Isso torna a estimativa mais rápida, podendo ser usada em roteadores e *switches* como indicadores de condições de tráfego.

Para isso, limitamos a estimativa do expoente de Hölder pontual de cada amostra, à sua respectiva janela de tempo, ou seja, para a estimativa do expoente de Hölder da amostra de uma janela, usamos amostras apenas desta janela. As janelas são sequenciais e cada amostra pertence somente à uma única janela. Três tamanhos de janelas foram consideradas: janela 11 (2048 instantes de tempo), janela 12 (4096 instantes de tempo) e janela 13 (8192 instantes de tempo). Como referência para comparação, consideramos o expoente de Hölder de cada amostra, estimado utilizando-se todas os 16384 (2^{14}) instantes de tempo disponíveis, conforme a seção anterior.

As amostras de tráfego utilizadas para análise são as mesmas usadas anteriormente. A wavelet continua sendo a *Morlet* e sua escala máxima é 2^{j-2} , sendo 2^j o tamanho da janela amostral.

Como medida de desempenho da estimação, consideramos o erro quadrático médio normalizado (EQMN), definidos a seguir:

$$EQMN = \frac{E[(h_{ref} - h_{jan})^2]}{\sigma^2_{h_{ref}}} \quad (8)$$

onde h_{jan} é o expoente de Hölder pontual estimado via janelamento, h_{ref} é o expoente de Hölder pontual usado como referência e $\sigma^2_{h_{ref}}$ é a variância dos expoentes de Hölder pontuais de referência.

TABELA I
ERRO QUADRÁTICO MÉDIO NORMALIZADO

	Janela 11	Janela 12	Janela 13
série decl	0,4899	0,2483	0,0426
série lbl5	0,5423	0,4332	0,2116

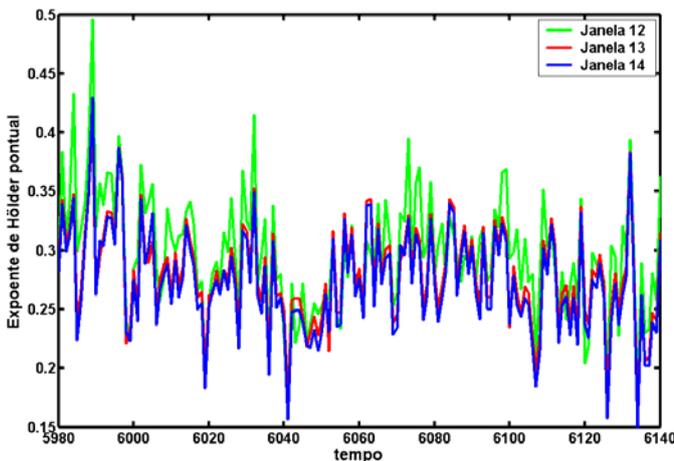


Fig.5. Expoentes de Hölder pontuais de amostras da série *decl*, estimados com três tamanhos diferentes de janelamento.

Conforme a tabela I e a Figura 5, verifica-se que há um gradual aumento da imprecisão da estimação do expoente de Hölder pontual em relação à referência, com a diminuição do tamanho da janela. Em contrapartida, cada estimação se dá de maneira mais rápida, devido à diminuição da quantidade de coeficientes wavelets relativos à janela. Pelos erros obtidos pode-se concluir que a estimação do expoente de Hölder pontual em janelas é eficaz na caracterização da regularidade local do tráfego Internet.

IV. ESCALONADOR GPS COM EXPOENTE DE HÖLDER PONTUAL JANELADO

Visto que o expoente de Hölder pontual serve como indicador de rajadas do tráfego Internet e que pode ser calculado usando uma menor quantidade de pontos via janelamento, nossa proposta é aplicar a informação trazida

pelo expoente de Hölder pontual em um novo esquema de escalonamento de fluxos de dados.

Sabemos que roteadores e *switches* utilizam escalonadores como mecanismos para alocação da taxa de transmissão disponível a diversos fluxos de dados, cada qual com seu requisito de qualidade de serviço. Uma dessas disciplinas de escalonamento mais utilizada é o *Generalized Processor Sharing* (GPS) [11]. Ele tem como virtude, o isolamento dos fluxos de entrada, não permitindo que um fluxo mal-comportado interfira no restante; enquanto isso, permite compartilhamento da taxa de transmissão total, proporcional aos requisitos de cada fluxo, proporcionando uma multiplexagem estatística do tráfego mais eficiente.

A. Escalonamento GPS para Múltiplos Fluxos de Dados

GPS é uma disciplina de escalonamento, onde n fluxos de entrada compartilham um servidor de taxa fixa c . Um conjunto de parâmetros $\{\varphi_i\}_{1 \leq i \leq n}$ determinam o compartilhamento da taxa de serviço que cada fluxo recebe.

Cada fluxo i de entrada recebe ao menos $c_i = \left(\varphi_i / \sum_{j=1}^n \varphi_j \right) c$,

que é sua taxa garantida. Caso algum fluxo esteja ocioso num determinado instante, sua taxa residual é (re)distribuída proporcionalmente aos fluxos ativos.

Considere n fluxos de entrada, modelados como um fluido infinitamente divisível e cada qual com sua ponderação φ_i ,

com $\sum_{i=1}^n \varphi_i = 1$. O processo de serviço $s_k(t)$ do fluxo k , é

variante no tempo e em qualquer instante t , pode ser determinado por taxas residuais de outros $n-1$ fluxos e as respectivas ponderações φ_i , $i = 1, \dots, k-1, k+1, \dots, n$. Em geral, e como simplificação, dividimos a taxa total de serviço c em n servidores com taxas de serviço a_1, a_2, \dots, a_n . Ou seja, em vez de trabalharmos com n seções compartilhando um servidor, agora trabalharemos com n sistemas filas separadas, cada qual com seu servidor dedicado, como na Figura 6. A decomposição é tal que $\sum_{i=1}^n a_i \leq c$ e $\bar{\lambda}_i \leq a_i, \forall i \in 1, 2, \dots, n$ onde

$\bar{\lambda}_i$ é a taxa média de chegada do fluxo i . Na decomposição, assumimos que $a_i = c_i$, onde c_i é a taxa de serviço mínima garantida do sistema fila i sob serviço GPS.

Seja $B(t)$ o número de fluxos ativos e $\bar{B}(t)$ os fluxos ociosos, tal que sempre $B(t) + \bar{B}(t) = n$. Então a taxa de serviço instantânea s_k , de um fluxo $k \in B(t)$ é dado por :

$$s_k(t) = c_k + \frac{\varphi_k}{\varphi_k + \sum_{l \in B(t), l \neq k} \varphi_l} \sum_{l \in \bar{B}(t)} (c_l - r_l(t)) \quad (9)$$

Ou seja, cada fluxo k , ativo, é composto por sua mínima taxa garantida c_k , acrescida por uma fração proporcional a φ_k da soma dos resíduos individuais $c_l - r_l(t)$ de fluxos atualmente ociosos que apenas necessitaram de $r_l(t) < c_l$ para seu serviço instantâneo.

Nossa proposta é obter os parâmetros φ_k de (re)distribuição das taxas residuais dos fluxos de maneira dinâmica e que reflita as necessidades instantâneas de cada fluxo. Para isso utilizamos o expoente de Hölder pontual para a definição dos parâmetros φ_k em cada instante de tempo.

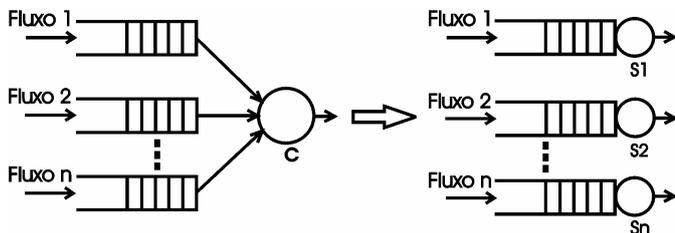


Fig.6. Decomposição e isolamento das filas num sistema GPS com N fluxos

B. Simulações e Resultados

A simulação foi realizada utilizando-se três fluxos formados por traços das séries *dec1*, *dec2* e *lbl5* [12], alguns já utilizados anteriormente, com as seguintes características:

TABELA II
CARACTERÍSTICAS DOS FLUXOS

	Média	Desvio Padrão
fluxo 1	500 Kbps	316,5 Kbps
fluxo 2	1 Mbps	464,43 Kbps
fluxo 3	250 Kbps	334,24 Kbps

Cada fluxo teve como garantia mínima de taxa de serviço, referente ao c_k , sua taxa média de chegada e foi modelado como um fluido de bytes. Os fluxos possuem buffers de tamanhos iguais e fixos e foram feitas simulações com vários tamanhos de buffers e taxas totais de serviço, referentes às taxas de transmissão totais.

Usaremos o esquema de escalonamento GPS para redistribuição das taxas residuais dos fluxos segundo três critérios:

1. φ_k diretamente proporcional à taxa média de chegada de cada fluxo (definido como GPS comum);
2. φ_k inversamente proporcional ao expoente de Hölder pontual médio de cada fluxo;
3. φ_k inversamente proporcional ao expoente de Hölder pontual instantâneo de cada fluxo.

O intervalo de alocação de uma nova taxa a cada fluxo equivale ao intervalo de tempo entre duas amostras (100 ms). Nesse ínterim, alguns fluxos podem ter uma taxa excessiva às suas necessidades momentâneas, sendo redistribuída segundo as ordens de prioridade citadas; outra consequência é alguns fluxos terem uma taxa insuficiente às suas necessidades naquele intervalo, mesmo após a realocação do excedente de outras. Logo, há a possibilidade de perda de

pacotes devido ao transbordamento do buffer de alguns fluxos e, inclusive, má utilização da taxa de transmissão total.

A simulação também foi realizada utilizando-se quatro tamanhos diferentes de janelas para estimação do expoente de Hölder pontual. Assim verificamos quanto a imprecisão da estimação do expoente de Hölder influencia no escalonamento.

Como resultado geral, para todas as taxas totais de transmissão e tamanhos de buffers, constatamos que o uso do expoente de Hölder pontual, como indicador das características instantâneas de cada fluxo, diminui a taxa de perda de dados e o desperdício da taxa de transmissão disponível em relação ao GPS comum.

As tabelas III, IV e V mostram as seguintes tendências observadas nos resultados das simulações:

1. A diminuição do tamanho da janela na estimação do expoente de Hölder pontual (notação $H_{Pont J_-}$, nas tabelas) aumenta a taxa de perda de dados e diminui o ganho em relação ao GPS comum, devido à imprecisões na própria estimação do expoente (conforme mostrado na seção III-C).
2. Para um mesmo tamanho do buffer, o aumento da taxa de transmissão total proporciona uma diminuição da perda de dados, um aumento no ganho de desempenho do GPS proposto em relação ao GPS comum, mas uma quantidade maior da própria taxa de transmissão total inutilizada, de maneira geral.
3. Para um mesmo tamanho da taxa de transmissão total, o aumento do tamanho do buffer proporciona uma diminuição da perda de dados, um aumento no ganho de desempenho do GPS proposto em relação ao GPS comum e um melhor aproveitamento da taxa de transmissão total.
4. O uso da média dos expoentes de Hölder (notação $H_{Médio}$, nas tabelas) como indicador das características instantâneas de cada fluxo, demonstrou desempenho similar ao GPS comum, nos fluxos analisados.

Observação: o ganho do GPS proposto sob o GPS comum aqui definimos como a redução percentual da taxa de perda de Bytes do GPS proposto sobre o GPS comum.

TABELA III
PERFORMANCE DO ESCALONADOR GPS
TAXA 2,25 MBPS
BUFFER 16 KBYTES

Estimador Utilizado	Taxa de Perda de Bytes	Ganho sobre o GPS comum	Desperdício da Taxa Total
Taxa média	0,0168	-	0,2353
H Médio	0,0168	0 %	0,2353
H Pont J14	0,0145	13,69 %	0,2335
H Pont J13	0,0151	10,12 %	0,2340
H Pont J12	0,0152	9,52 %	0,2340
H Pont J11	0,0156	7,14 %	0,2343

TABELA IV
PERFORMANCE DO ESCALONADOR GPS
TAXA 2,25 MBPS
BUFFER 25 KBYTES

Estimador Utilizado	Taxa de Perda de Bytes	Ganho sobre o GPS comum	Desperdício da Taxa Total
Taxa média	0,0124	-	0,2318
H Médio	0,0124	0 %	0,2318
H Pont J14	0,0102	17,74 %	0,2302
H Pont J13	0,0106	14,52 %	0,2304
H Pont J12	0,0106	14,52 %	0,2305
H Pont J11	0,0112	9,68 %	0,2309

TABELA V
PERFORMANCE DO ESCALONADOR GPS
TAXA 2,75 MBPS
BUFFER 25 KBYTES

Estimador Utilizado	Taxa de Perda de Bytes	Ganho sobre o GPS comum	Desperdício da Taxa Total
Taxa média	0,0021	-	0,3649
H Médio	0,0021	0 %	0,3659
H Pont J14	0,0014	33,33 %	0,3645
H Pont J13	0,0015	28,57 %	0,3646
H Pont J12	0,0015	28,57 %	0,3646
H Pont J11	0,0015	28,57 %	0,3646

V. CONCLUSÕES

O expoente de Hölder pontual pode ser usado para descrever características locais de tráfego. A estimação desses expoentes em janelas de tempo possibilita um processamento mais rápido, levando a aplicações mais dinâmicas e até mesmo em tempo real.

Pode-se concluir que um esquema de escalonamento que faz uso do expoente de Hölder pontual instantâneo calculado em janelas possui melhor desempenho em relação à perda de *bytes* e uso da taxa de transmissão, se comparado à escalonadores que usam como critério de redistribuição da taxa a média (GPS comum) ou o expoente de Hölder pontual médio.

Como trabalho futuro, pode-se tentar antecipar surtos de tráfego pela predição do expoente de Hölder pontual e usar essa informação em um esquema de escalonamento.

REFERÊNCIAS

- [1] W. E. Leland, M. S. Taqqu, W. Willinger, e D. V. Wilson, "On the self-similar nature of Ethernet traffic (extended version)", *IEEE/ACM Trans. Networking*, pp. 1-15, Fevereiro 1994.
- [2] V. Paxson e S. Floyd, "Wide-area traffic: The failure of Poisson modelling", *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 3(3):226-244, 1995.
- [3] J. L. Vehe e R. Riedi. "Multifractal properties of TCP/IP traffic : a numerical study". INRIA Technical Report, 1997.
- [4] P. Abry, R. Baraniuk, P. Flandrin, R. Riedi, and D. Veitch, "The multiscale nature of network traffic: Discovery, analysis and

modelling", *IEEE Signal Processing Mag.*, vol. 19, no. 3, pp. 28-46, 2002.

- [5] A. Feldmann, A. C. Gilbert e W. Willinger, "Data networks as cascades: Investigating the multifractal nature of Internet WAN traffic", *Proc. Of the ACM/SIGCOMM'98*, Vancouver, B.C., pp. 25-38, 1998.
- [6] I. Daubechies, *Ten lectures on wavelets*. SIAM, Philadelphia, 1992.
- [7] S. Mallat e W. L. Hwang. "Singularity detection and processing with wavelets". *IEEE Trans. Info. Theory*, 38(2):617-643, Março 1992.
- [8] Z. R. Struzik, "Determining Local Singularity Strengths and their Spectra with the Wavelet transform", *Fractals*, 8(1):469-475, Março 2000.
- [9] S. Jaffard, "Multifractal Formalism for Functions Part I: Results Valid for All Functions", *SIAM J. Math. Anal.*, 28(4):944-970, 1997.
- [10] S. Seuret e A. Gilbert, "Pointwise Hölder exponent estimation in data network traffic", *International teletraffic congress workshop*, Monterey, CA, 2000.
- [11] G. Lapiotis, S. Mao, S. Panwar, "GPS Analysis of Multiple Sessions with Applications to Admission Control", *ICC 2001 - IEEE International Conference on Communications*, no. 1, Junho 2001, pp. 1829-1833.
- [12] The Internet Traffic Archive, <http://ita.ee.lbl.gov/html/traces.html>.