

# Método de Compressão Híbrida para Geração de Pacotes Ópticos

L. Zão e R. Coelho

**Resumo**—Este trabalho apresenta a proposta de um método de compressão híbrida para a geração de pacotes ópticos. O desempenho do gerador de pacotes ópticos foi examinado para sinais com diferentes características de dependência temporal e para distribuições de diferentes padrões, tais como fBm, Gaussiana e Poisson. Os resultados demonstraram que o grau de dependência temporal (parâmetro de *Hurst*) pode ser afetado significativamente, dependendo da potência de ruído. Os resultados demonstraram também a importância de se considerar sinais com diferentes distribuições marginais ou padrões.

**Palavras-Chave**— comunicações ópticas, redes ópticas, geradores de pacotes ópticos, parâmetro de *Hurst*, processo fBm.

**Abstract**—This paper presents a hybrid compression method for optical packets generators. The performance of the proposed method was examined considering signals with different patterns or distributions. For the experiments it was considered signals with fBm, Gaussian and Poisson distributions. The results demonstrated that the signals with long range dependence (*Hurst* parameter) can significantly be affected by the noise level power. The results also showed the importance of using different marginal distribution in optical communications performance evaluation experiments.

**Keywords**— optical communications, optical networks, optical packets generators, Hurst parameter, fBm process.

## I. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de dispositivos ópticos [1] [2], a custos competitivos, impulsionou recentes pesquisas com o objetivo de alcançar uma rede comutada inteiramente no meio óptico. A comutação de pacotes é bastante promissora para as futuras redes ópticas devido às altas e variáveis taxas de transmissão, transparência de formatos e escalabilidade [2] [3] [4] [5].

Na comutação óptica de pacotes, o comprimento de onda é atribuído ao pacote durante uma fração do tempo, enquanto este trafega pela rede. Assim, é possível uma melhor utilização do enlace óptico, onde diversos sinais, de diferentes origens, compartilham o mesmo meio físico. Logo, espera-se atingir a total capacidade de multiplexação dos sistemas WDM (*wavelength division multiplexing*). Essa vantagem da comutação de pacotes pode acarretar, no entanto, em situações de contenção. A ausência de componentes de armazenamento (*buffers*) comerciais, tais como RAM óptica, que serviriam para controle e prevenção da contenção instantânea, ainda é um fator limitante para as pesquisas nesta área. O principal desafio da comutação de pacotes ópticos é justamente a análise e controle da contenção [2] [4].

Leonardo Zão e Rosângela Coelho, Departamento de Engenharia Elétrica, Laboratório de Redes e Sistemas Ópticas (LaRSO), Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, Brasil, E-mail: coelho@ime.br. Este trabalho foi parcialmente apoiado pelo URP (*University Research Program*) da CISCO/USA e pelo CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico).

Para a análise, teórica ou experimental, do desempenho de sistemas de comunicações ópticas, do dimensionamento de *buffers* e enlaces ópticos assim como do controle da contenção, é necessária a utilização de geradores de pacotes com distribuições distintas. Estes geradores devem representar os padrões de sinais de tráfego reais, tais como vídeo, voz e dados, e também, seus parâmetros estatísticos. A presença do grau de dependência temporal, geralmente representada pelo parâmetro de *Hurst* ( $H$ ) [6], foi verificada em diferentes sinais de tráfego [7] [8] [9] [10]. O impacto dessa característica no dimensionamento de *buffers* e enlaces, ainda é um grande desafio para o meio eletrônico [11] [12]. O principal limitante está na obtenção de uma teoria capaz de avaliar o real impacto de sinais com dependência temporal no desempenho dos sistemas de comunicações. Acredita-se, por exemplo, que a dependência temporal tenha uma forte relação com a degradação da variação do retardo (*jitter*) e que possa influenciar no dimensionamento dos *buffers* ópticos. Em [13] foi demonstrado que sinais com distribuições de cauda pesada, que garantem a representação da dependência temporal, provocam diferente impacto no desempenho das comunicações quando comparados a sinais markovianos puros ou com distribuições de Poisson.

Neste trabalho, é proposto um método de compressão híbrida para geração de pacotes ópticos representantes de diferentes distribuições ou padrões de sinais, e diferentes graus de dependência temporal ( $0 < H < 1$ ). O principal objetivo é obter um ambiente de análise de desempenho de comunicações ópticas mais diversificado e mais próximo de sinais de tráfego reais. Os padrões desenvolvidos são baseados nos processos estocásticos movimento Browniano fracionário (*fBm - fractional Brownian motion*) [14] (*fBm\_silence*), Gaussiano (*gauss\_silence*) e Poisson (*poisson\_silence*). O método de compressão híbrida proposto, foi também avaliado com a sequência de vídeo real *Silence of the Lambs* (*silence*) codificada em H.263. Esta sequência de vídeo foi escolhida devido à intrínseca presença de dependência temporal resultante do processo de codificação. Os resultados da análise demonstraram que o grau de dependência temporal pode mudar drasticamente com um alto nível de ruído.

O restante do trabalho está organizado da seguinte forma: na seção II, são apresentados alguns conceitos e métodos de geração de pacotes ópticos abordados neste trabalho. A seção III descreve o método de compressão híbrida proposto. Nesta seção, são também descritas algumas definições de dependência temporal e processo fBm. Os principais resultados numéricos obtidos da análise são apresentados e discutidos na seção IV. Finalmente, a seção V apresenta a conclusão deste trabalho.

## II. MÉTODOS DE COMPRESSÃO DE PACOTES ÓPTICOS

Para alcançar uma rede comutada por pacotes, totalmente no domínio óptico, é necessário que todo o controle seja realizado neste meio, sem necessidade de conversão eletro-óptica.

Os pacotes ópticos podem possuir tamanho fixo ou variável. Geralmente, as opções do formato do pacote são realizadas segundo o tipo de comunicação óptica adotada, ou seja, síncrona ou assíncrona [2]. Devido à simplicidade, a maioria das pesquisas adota tamanho fixo. O tamanho e formato de pacote para redes ópticas ainda não foi definido ou padronizado.

O sistema KEOPS (*Keys to Optical Packet Switching*) [5] é um dos principais projetos de comutação óptica de pacotes apresentado na literatura. Neste sistema, o cabeçalho (*header*) do pacote é tratado no meio eletrônico. Logo, o cabeçalho e a informação (*payload*) são transmitidos em taxas, meios e tempos distintos. Em [15] os autores propuseram um método de geração de pacotes ópticos para utilização em redes ópticas em anel (*RingO - Ring Optical*). Nesta proposta, os bits do campo informação (obtidos por um gerador de padrões a 2.5 Gbps) e o cabeçalho são modulados na mesma taxa. Ou seja, não foi necessária a compressão de bits no meio óptico. O cabeçalho contém o comprimento de onda que designa cada estação da rede em anel. Os projetos KEOPS e RingO utilizaram tamanho de pacote fixo e igual a  $1\mu s$ . O tamanho do pacote óptico ( $l$ ) é geralmente obtido pela expressão

$$l = \frac{c}{n} \times \frac{b}{B} \quad (1)$$

onde  $c = 3 \times 10^8 m/s$  é a velocidade da luz,  $n = 1.5$  é o índice de refração da fibra,  $b$  é a quantidade de bits e  $B$  é a taxa (em bits/s) do enlace óptico.

Para a montagem dos pacotes ópticos, e devido às baixas taxas de geração do meio eletrônico-digital, origem dos sinais de tráfego, é necessária a compressão de bits. Os principais métodos de compressão óptica, propostos na literatura, podem ser classificados em 3 tipos: (i) compressão simples [16]; (ii) compressão com amplificação [17]; e (iii) compressão com re-circulação [16].

A compressão simples [16], ilustrada na Fig. 1, é realizada através de  $k$  estágios de compressão, onde cada estágio é responsável pela compressão dos grupos de bits que formarão o pacote óptico. Nessa compressão, realizada em 2 canais, a informação passa pelos estágios da compressão, resultando em  $2^k$  bits como tamanho máximo desejado dos pacotes, onde  $T$  é o espaçamento inicial e  $\tau$  é o espaçamento final entre bits. Na Fig. 2, observa-se um estágio de compressão simples. Note que a informação de um dos 2 canais passa por linhas de atraso (FDL - *fiber delay lines*), cujo tamanho varia de acordo com o estágio de compressão. Esta separação ou desacoplamento dos canais é realizada através de um modulador óptico. Os bits do estágio são, em seguida, re-acoplados para formar o pacote.

Na compressão com amplificação [17] (vide Fig. 3), utilizam-se amplificadores ópticos (SOA - *Semiconductor Optical Amplifier*), que substituem os moduladores da compressão simples. Esta solução visa compensar as atenuações sofridas pelos sinais nos componentes ópticos (por exemplo, FDL e acopladores) dos canais de cada estágio. No entanto, essa

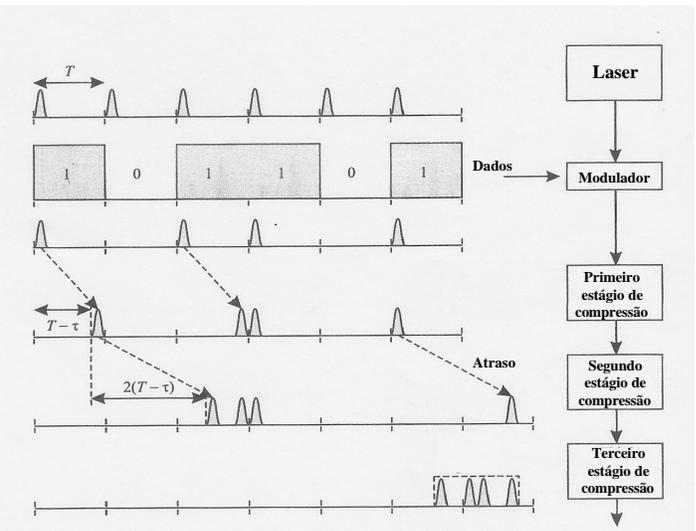


Fig. 1. O esquemático para a compressão dos bits no domínio óptico: a informação passa por  $k$  estágios de compressão, onde  $2^k$  é a menor potência de 2 que não é menor que o tamanho desejado dos pacotes

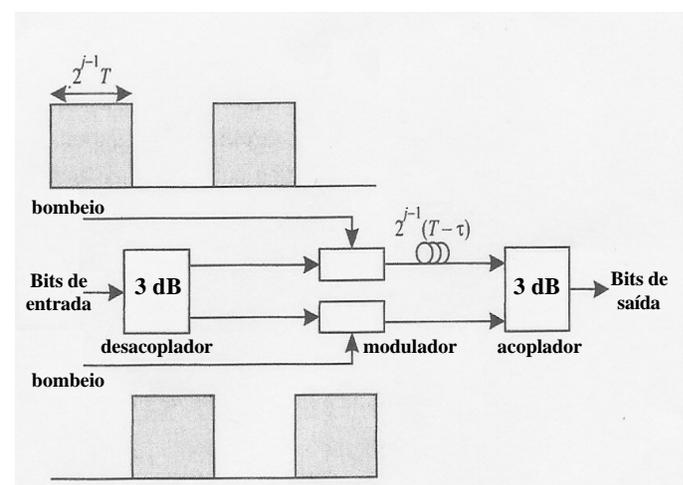
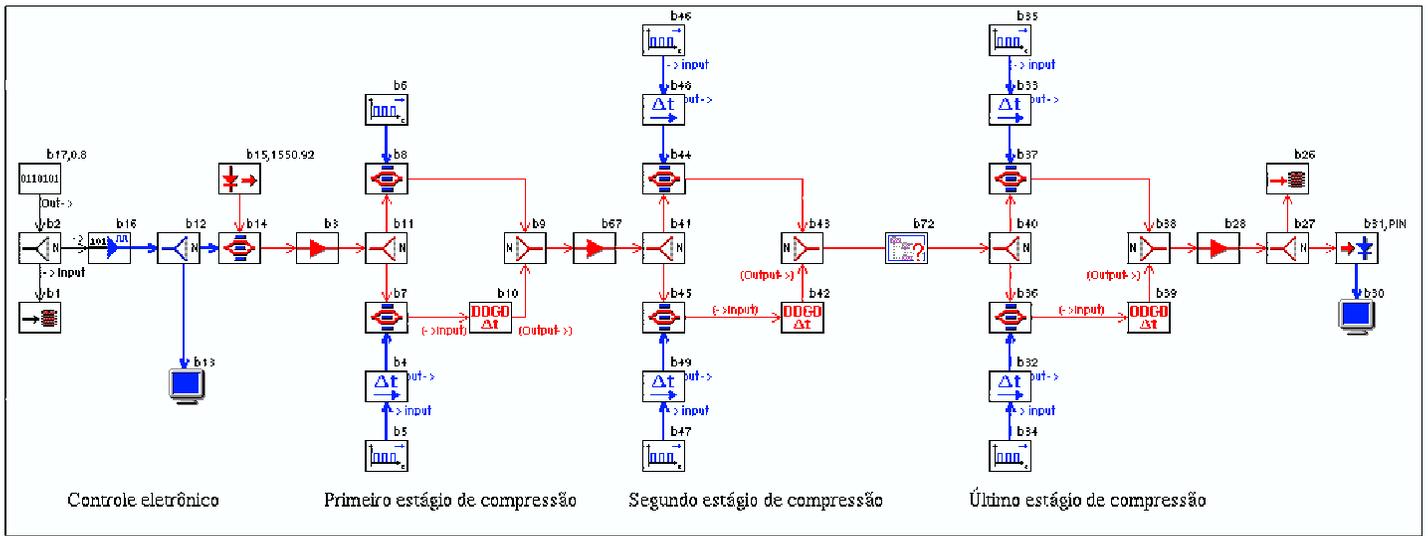


Fig. 2. Estágio de compressão simples: o sinal é dividido em 2 canais onde um destes passa por linhas de atraso.

solução se torna extremamente custosa, uma vez que é necessário um par de SOAs para cada estágio de compressão.

Na compressão com re-circulação [16], o sinal é comprimido fazendo-o passar por um canal de re-circulação contendo linhas de atraso. Cada re-circulação realiza um estágio da compressão dos bits da informação. Aqui também, ressalta-se a necessidade do uso de um amplificador no canal de re-circulação para compensar as atenuações sofridas pelo sinal no mesmo. Existe uma limitação relevante na compressão com re-circulação: o grupo de bits do pacote necessita estar inteiramente presente em um único ciclo do canal de re-circulação. Assim, utilizar a compressão com re-circulação na geração de pacotes ópticos implica na limitação do tamanho do pacote.

A compressão híbrida, proposta neste trabalho, é uma solução intermediária entre a compressão simples e a compressão com amplificação. Esta compressão híbrida é apresentada na seção seguinte.



Unit: figura

Fig. 4. O método de compressão híbrida proposto (Exemplo com 3 estágios).

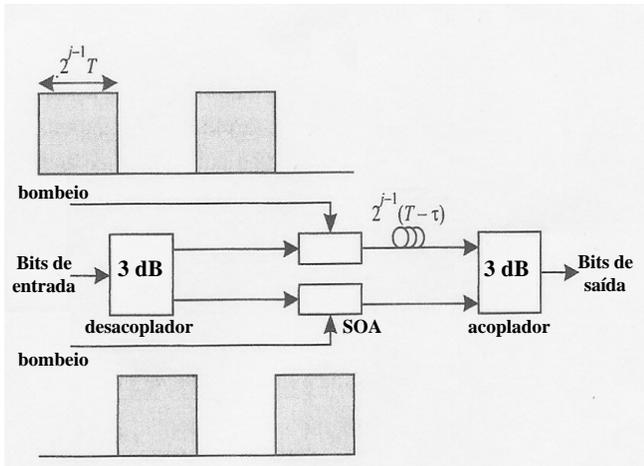


Fig. 3. Estágio de compressão com amplificação: SOA com a função de modulador e amplificador.

### III. MÉTODO DE COMPRESSÃO HÍBRIDA DE PACOTES ÓPTICOS

A Fig. 4 apresenta o método de compressão híbrida proposto neste trabalho. Como pode-se observar, os estágios de compressão utilizados são semelhantes ao da compressão simples. Contudo, para as atenuações sofridas pelo sinal durante os estágios de compressão, a solução foi a implantação de amplificadores ópticos apenas em pontos específicos dos estágios de compressão (entrada, saída e posições intermediárias). A diferença desta compressão para a compressão com amplificação, está na posição dos amplificadores. Enquanto que na compressão com amplificação eles se situam dentro de cada estágio de compressão, no método de compressão híbrida eles se encontram entre os estágios de compressão. Nesta proposta foram adotados amplificadores EDFA (*Erbium Doped Fiber Amplifiers*) [1] e operação dos *lasers* nos comprimentos de onda de 1550,92nm e 1549,32nm.

O desempenho da compressão híbrida foi avaliado

considerando-se sinais com distribuições/padrões que representem o grau de dependência temporal ou parâmetro de *Hurst*. O objetivo principal era verificar a influência deste parâmetro na compressão óptica. A compressão híbrida foi examinada para sinais com distribuições fBm, Gaussiana e Poisson, além de uma sequência de vídeo real, para a obtenção de uma análise mais precisa e não-tendenciosa. Na próxima sessão, é apresentada uma breve definição do grau de dependência temporal e do processo estocástico fBm.

#### A. A dependência temporal e o processo fBm

Um processo estocástico  $X(t)$  pode ser classificado quanto ao seu grau de dependência temporal como anti-persistente ou com dependência negativa ( $H < \frac{1}{2}$ ), com dependência de curto alcance (SRD - *short range dependence*) ( $H = \frac{1}{2}$ ) ou com dependência de longo alcance (LRD - *long range dependence*) ( $H > \frac{1}{2}$ ). A dependência temporal define a frequência da variação da função auto-correlação (FAC -  $\rho(k)$ ) das amostras de um sinal no infinito.

O fBm é um processo estocástico Gaussiano ( $X_H(t)$ ) de parâmetro contínuo  $t$ , média nula e incrementos estacionários, independentes, cuja variância é proporcional ao intervalo de tempo entre eles. Logo,

$$Var[X(t_2) - X(t_1)] \propto |t_2 - t_1|^{2H} \quad (2)$$

para  $0 \leq t_1 \leq t_2$ . O fBm é o único processo auto-similar cujo grau de dependência é inteiramente definido pelo parâmetro  $H$  ( $0 < H < 1$ ). Isto significa que suas características estatísticas se mantêm para qualquer escala no tempo. Assim, para quaisquer  $\tau$  e  $r > 0$  temos que:

$$[X_H(t+\tau) - X_H(t)]_{\tau \leq 0} \stackrel{d}{\approx} r^{-H} [X_H(t+r\tau) - X_H(t)]_{\tau \leq 0} \quad (3)$$

onde  $r$  é o fator de escala do processo e o símbolo  $\stackrel{d}{\approx}$  significa semelhante em distribuição. Um processo fBm,  $X_H(t)$ , é

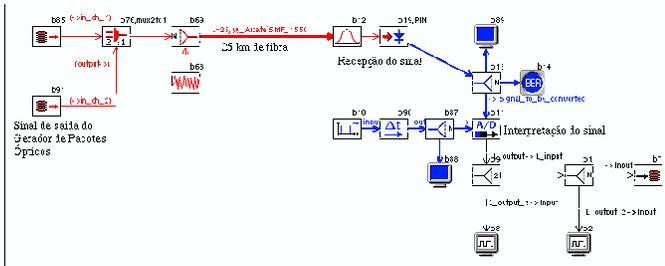
completamente caracterizado por sua média ( $m$ ), variância ( $\sigma^2$ ) e  $H$ , e sua FAC é definida por

$$\rho(k) = \frac{1}{2}\sigma^2[(k+1)^{2H} - 2k^{2H} + (k-1)^{2H}]. \quad (4)$$

Em [18], os autores propuseram a discretização do fBm, obtendo um novo processo  $A(t)$  com características de invariância em escala, mas com média e variância não-nulas. Por exemplo, considere  $A(t)$  como sendo o número de bits recebidos por um multiplexador até o instante  $t$ , temos que:

$$A(t) = mt + \sqrt{am}X_H(t), \quad (5)$$

onde  $m$  é a taxa média de chegadas de bits,  $a = \text{Var}[A(t)]/(mt)^{2H}$  é o coeficiente de variância e  $H \in (\frac{1}{2}, 1)$  é o parâmetro  $H$ . Norros demonstrou que o processo  $A(t)$  possui a propriedade de aditividade. Assim sendo, a soma  $A(t) = \sum_{i=1}^W A_i(t)$ , onde  $A_i(t) = m_i t + \sqrt{m_i a} X_i(t)$ ,  $i = 1, \dots, W$ , e  $X_i(t)$  são processos fBm independentes com parâmetros  $a$ ,  $H$  e médias individuais  $m_i$ . Logo,  $A(t)$  pode ser expressa pela Eq. 5 onde  $m = \sum_{i=1}^W m_i$  e  $X_H(t)$  é um fBm com parâmetro  $H$ . Portanto, a sobreposição de processos fBm gera um novo processo fBm. Esta característica do processo fBm é importante para o estudo de sinais agregados ou multiplexados.



Unit: CPSS

Fig. 5. Experimento de transmissão óptica: os sinais da saída do gerador de pacotes ópticos são multiplexados no comprimento de onda, percorrem uma fibra de 25 km de comprimento, e são finalmente interpretados, após serem convertidos para o meio eletrônico.

#### IV. RESULTADOS NUMÉRICOS

O método de compressão híbrida proposto neste trabalho foi avaliado por simulação, utilizando-se o pacote OPTSIM da RSOFT, na versão Linux [19]. Para análise foi simulado um experimento, dividido em duas fases. A primeira fase, conforme ilustra a Fig. 4, mostra o método de compressão híbrida, através de diversos estágios de compressão, avaliado neste trabalho. Já a Fig. 5 ilustra a segunda fase do experimento, onde o sinal comprimido na primeira fase é transmitido por uma fibra óptica de 25 km de comprimento, modulada para o domínio elétrico e, posteriormente, interpretada por um conversor analógico-digital. Os pacotes gerados possuem a duração de  $1\mu s$  e totalizaram 12 estágios de compressão.

A Tab. I apresenta os valores de média ( $m$ ), desvio-padrão ( $\sigma$ ) e parâmetro de Hurst ( $H$ ) estimados da sequência *silence* original, bem como das sequências geradas segundo as distribuições Gaussiana, fBm e Poisson.

A estimação do parâmetro  $H$  das diversas sequências analisadas neste trabalho, foi realizada utilizando-se o pacote HEP

TABELA I  
PARÂMETROS DAS SEQUÊNCIAS GERADAS.

| Sequência              | $m$ (bits/quadro) | $\sigma$ (bits/quadro) | $H$   |
|------------------------|-------------------|------------------------|-------|
| <i>silence</i>         | 79,639            | 29,529                 | 0,894 |
| <i>gauss_silence</i>   | 79,062            | 29,233                 | 0,565 |
| <i>fBm_silence</i>     | 80,786            | 25,758                 | 0,842 |
| <i>poisson_silence</i> | 81,765            | 73,060                 | 0,526 |

TABELA II  
PARÂMETROS  $H$  DAS SEQUÊNCIAS *silence* NA SAÍDA DA REDE.

| Ruído incrementado | $H$   |
|--------------------|-------|
| original           | 0.894 |
| + 1 dB             | 0.896 |
| + 2 dB             | 0.857 |
| + 3 dB             | 0.647 |
| + 4.5 dB           | 0.635 |

(*Hurst Estimator Package*). Este *software* foi desenvolvido no Laboratório de Redes e Sistemas Ópticos (LaRSO) do IME. O HEP permite ao usuário escolher entre 3 métodos de estimação: ReScaled Statistics (R/S) [6], Higuchi [20] e *Wavelets* [21] [22]. Para as estimações das sequências apresentadas nesta seção foi utilizado o método baseado em *Wavelets*, com filtros DAUB6 e DAUB4. Os filtros *Wavelets* Daubechies: DAUB6 com 6 coeficientes nas escalas de 3-6 e DAUB4 com 4 coeficientes e escalas de 1-4 [23].

As amostras foram geradas com a mesma quantidade de bits ( $4,5 \times 10^5$ ) de forma a atingir resultados de  $m$  e  $\sigma$  similares aos parâmetros da sequência *silence* original, e também para a obtenção de um experimento estatístico representativo. Note que as amostras geradas com fBm (*fBm\_silence*) possuem valores de  $H$  semelhantes a sequência *silence* original. As sequências *gauss\_silence* e *poisson\_silence*, no entanto, possuem  $H \cong 0,5$ , característica representativa de amostras com presença de SRD ou dependência de curto alcance. O objetivo da análise era verificar a compressão óptica para sinais com LRD e SRD. Além disso, os sinais possuem funções densidade de probabilidade (fdp) distintas.

As medidas de desempenho apresentadas para diferentes níveis de ruído são as seguintes: (i) a taxa de erro de bits

TABELA III  
PARÂMETROS  $H$  DAS SEQUÊNCIAS *gauss\_silence* NA SAÍDA DA REDE.

| Ruído incrementado | $H$   |
|--------------------|-------|
| original           | 0.565 |
| + 1 dB             | 0.537 |
| + 2 dB             | 0.527 |
| + 3 dB             | 0.524 |
| + 4.5 dB           | 0.519 |

TABELA IV  
PARÂMETROS  $H$  DAS SEQUÊNCIAS *fBm\_silence* NA SAÍDA DA REDE.

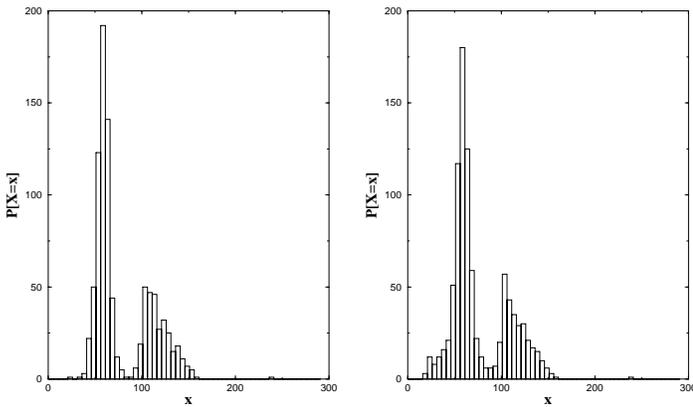
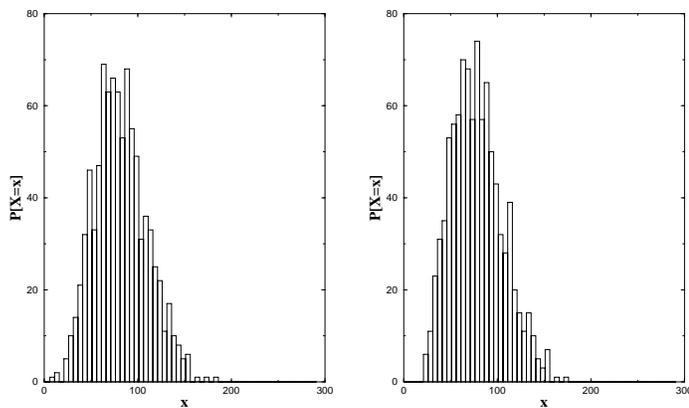
| Ruído incrementado | $H$   |
|--------------------|-------|
| original           | 0.842 |
| + 1 dB             | 0.815 |
| + 2 dB             | 0.864 |
| + 3 dB             | 0.808 |
| + 4.5 dB           | 0.694 |

TABELA V

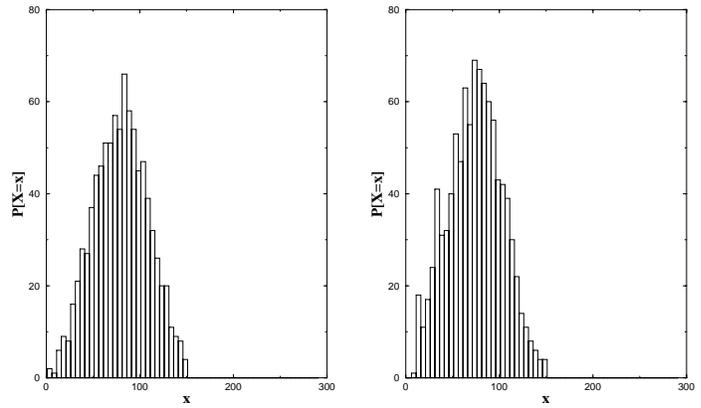
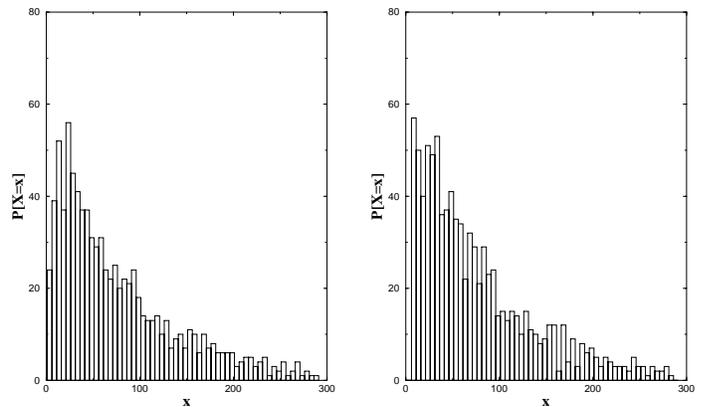
PARÂMETROS  $H$  DAS SEQUÊNCIAS *poisson\_silence* NA SAÍDA DA REDE.

| Ruído incrementado | $H$   |
|--------------------|-------|
| original           | 0.526 |
| + 1 dB             | 0.547 |
| + 2 dB             | 0.525 |
| + 3 dB             | 0.502 |
| + 4.5 dB           | 0.516 |

(BER - *Bit Error Rate*); (ii) o parâmetro de *Hurst* do sinal de saída; e (iii) a fdp dos sinais de entrada e saída. As Tabs. II, III, IV e V mostram os resultados da estimação de  $H$  dos sinais para os tráfegos representados pelas sequências *silence*, *gauss\_silence*, *fBm\_silence* e *poisson\_silence*, respectivamente, com o aumento da potência de ruído.

Fig. 6. a) fdp da sequência *silence* transmitida e b) fdp da recepção com acréscimo de 3 dB.Fig. 7. a) fdp da sequência *fBm\_silence* transmitida e b) fdp da recepção com acréscimo de 3 dB.

Das simulações realizadas, verificou-se que o parâmetro  $H$  permanece inalterado no sinal obtido na saída da rede até um valor de BER da ordem de  $10^{-5}$ . Com o objetivo de verificar o comportamento de  $H$  e obter variações nestas medidas, a potência de ruído foi incrementada em níveis: 1dB, 2dB, 3dB e 4,5dB.

Fig. 8. a) fdp da sequência *gauss\_silence* transmitida e b) fdp da recepção com acréscimo de 3 dB.Fig. 9. a) fdp da sequência *poisson\_silence* transmitida e b) fdp da recepção com acréscimo de 3 dB.

Note que para os sinais que possuíam originalmente características LRD ( $H > 0,5$ ) (Tabs. II e IV), os valores de  $H$  mudaram drasticamente com o incremento da potência de ruído. Já os sinais com características SRD ( $H \cong 0,5$ ) não sofreram grandes alterações (vide Tabs. III e V). Estes resultados demonstraram a importância da consideração do parâmetro  $H$  na determinação da faixa limitante de operação de um sistema óptico.

As Figs. 6, 7, 8 e 9 apresentam as fdps dos sinais *silence*, *fBm\_silence*, *gauss\_silence* e *poisson\_silence* gerados (origem) e as fdps após a compressão híbrida e transmissão óptica dos mesmos, para um acréscimo de 3dB na potência do ruído. Este valor foi escolhido por ter sido notado uma variação brusca de  $H$  na sequência *silence* quando submetido a este nível de ruído.

A Tab. VI apresenta os resultados de BER para as diferentes potências de ruído. Os resultados mostram que ocorreu uma defasagem de comportamento dos valores de BER para as diferentes sequências analisadas. Contudo, esta diferença não foi muito significativa.

A compressão híbrida proposta neste trabalho é parte integrante do gerador de pacotes ópticos em desenvolvimento no

TABELA VI  
RESULTADOS DE BER PARA AS DIFERENTES SEQUÊNCIAS GERADAS.

| Ruído   | <i>silence</i>        | <i>fBm_silence</i>    | <i>gauss_silence</i>  | <i>poisson_silence</i> |
|---------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|
| +1 dB   | $2,60 \times 10^{-5}$ | $2,10 \times 10^{-5}$ | $2,00 \times 10^{-5}$ | $2,00 \times 10^{-5}$  |
| +2 dB   | $2,56 \times 10^{-4}$ | $2,74 \times 10^{-4}$ | $2,84 \times 10^{-4}$ | $2,35 \times 10^{-4}$  |
| +3 dB   | $1,85 \times 10^{-3}$ | $1,92 \times 10^{-3}$ | $1,94 \times 10^{-3}$ | $1,96 \times 10^{-3}$  |
| +4,5 dB | $1,70 \times 10^{-2}$ | $1,70 \times 10^{-2}$ | $1,70 \times 10^{-2}$ | $1,71 \times 10^{-2}$  |

LaRSO. Futuramente, será possível verificar se os resultados da simulação, apresentados neste trabalho, se confirmam na implementação em *hardware*. O gerador de pacotes ópticos deverá contar com as distribuições fBm, Gaussiana e Poisson para representação dos padrões de sinais. Estes padrões serão desenvolvidos utilizando-se placas FPGA (*Field Programmable Gate Array*). Outras distribuições também serão implementadas de forma a se obter um gerador de pacotes ópticos representando distintos padrões de sinais.

## V. CONCLUSÃO

Este trabalho apresenta a proposta de um método de compressão híbrida para a geração de pacotes ópticos. O desempenho do gerador de pacotes ópticos foi examinado para sinais com diferentes características de dependência temporal e para distribuições de diferentes padrões, tais como fBm, Gaussiana e Poisson. Os resultados demonstraram que o grau de dependência temporal (parâmetro de *Hurst*) pode ser afetado significativamente, dependendo da potência de ruído intrínseca à rede óptica. Os resultados demonstraram também a importância de se considerar diferentes fdps ou padrões para os sinais. Estas considerações afetam a análise e desempenho de componentes e sistemas ópticos.

## REFERÊNCIAS

- [1] M. S. Borella, J. P. Jue, D. Banerjee, B. Ramamurthy, and B. Mukherjee, "Optical components for wdm lightwave networks," *Proceedings of the IEEE*, vol. 85, pp. 1274–1307, August 1997.
- [2] G. I. Papadimitriou, C. Papazoglou, and A. S. Pomportsis, "Optical switching: Switch fabrics, techniques, and architectures," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 21, pp. 384–405, February 2003.
- [3] S. Yao and A. Dixit, "Advances in photonic packet switching: An overview," *IEEE Communications Magazine*, pp. 84–94, February 2000.
- [4] S. Danielsen et al, "Wavelength conversion in optical packet switching," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 16, pp. 2095–2108, December 1998.
- [5] C. Guillemot et al, "Transparent optical packet switching: The european acts keeps project approach," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 16, pp. 2117–2132, December 1998.
- [6] E. Hurst, "Long-term storage capacity of reservoirs," *American Society of Civil Engineers Trans.*, pp. 770–799, April 1951.
- [7] M. W. Garrett and W. Willinger, "Analysis, modeling and generation of self-similar VBR video traffic," *Proceedings of the ACM Sigcomm94*, pp. 269–280, September 1994.
- [8] M. E. Crovella and A. Bestavros, "Self similarity in world wide web traffic: Evidence and possible causes," *Proceedings of the ACM SIGMETRICS Intl. Conference on Measurement and Modeling of Computer Systems*.
- [9] W. E. Leland, M. S. Willinger, and D. V. Wilson, "On the self-similar nature of ethernet traffic (extended version)," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 2, pp. 1–15, February 1994.
- [10] D. Sharp et al, "Analysis of public safety traffic on trunked land mobile radio systems," *IEEE JSAC*, vol. 22, pp. 1197–1205, September 2004.
- [11] K. Park and W. Willinger, *Self-Similar Network Traffic: An Overview*. John Wiley & Sons, Inc., 2000.
- [12] W. Willinger, M. Taqqu, and A. Erramilli, "A bibliographical guide to self-similar traffic and performance modeling for modern high-speed networks," *Stochastic Networks: Theory and Applications*, pp. 339–366, Oxford University Press 1996.
- [13] E. Santos and R. Coelho, "Análise de contenção em buffers ópticos baseados em fdls e conversores de comprimento de onda," *XXI Simpósio Brasileiro de Telecomunicações - SBT'04*, September 2004.
- [14] B. Mandelbrot and J. Van Ness, "Fractional brownian motions, fractional noises and applications," *SIAM Review*, vol. 10, pp. 422–437, October 1968.
- [15] A. Carena, V. de Feo, J. M. Finochietto, R. Gaudino, F. Neri, C. Piglione, and P. Poggiolini, "Ringo: An experimental WDM optical packet network for metro applications," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2004.
- [16] S. Aleksic, "Packet-switched otdm networks employing the packet compression/expansion technique," vol. 5:3, pp. 273–288, 2003.
- [17] R. Ramaswami and K. N. Sivarajan, *Optical Networks, A Practical Perspective*. USA: Morgan Kaufmann Publishers, 2 ed., 2002.
- [18] I. Norros, "On the use of fractional brownian motion in theory of connectionless networks," *IEEE JSAC*, vol. 13, pp. 953–962, August 1995.
- [19] D. G. RSOFT, *OPTSIM User Manual*. Artis Software Corporation, 2003.
- [20] T. Higuchi, "Approach to an irregular time series on the basis of the fractal theory," *Physica D.*, 1988.
- [21] P. Abry et al, "Multiscale nature of network traffic," *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 19, pp. 28–46, May 2002.
- [22] P. Abry and D. Veitch, "Wavelet analysis of long-range dependent trafic," *IEEE Transactions on Information Theory*, January 1998.
- [23] I. Daubechies, *Ten Lectures on Wavelets*. Philadelphia: SIAM, 1992.