

# Análise de contenção em *buffers* ópticos baseados em FDLs e conversores de comprimento de onda

E. Santos Jr. e R. Coelho

**Resumo**—Neste trabalho examinamos a contenção em comutadores ópticos de pacotes e avaliamos seu desempenho para sinais de tráfegos com características de dependência temporal. Este estudo da contenção se baseia no dimensionamento de um *buffer* óptico composto de FDLs (*fiber delay lines*) e/ou conversores de comprimento de onda. Os modelos  $M/G/\infty$  e fBm (*fractional Brownian motion*) foram considerados na caracterização de tráfego com dependência temporal na entrada de cada porta óptica. Os resultados demonstraram que a distribuição do tráfego é um ponto crítico no desempenho dos comutadores e no dimensionamento dos *buffers* ópticos, e portanto, na contenção óptica. Além disso, verificamos que o grau de dependência temporal não foi afetado pelo processo de armazenamento nas FDLs.

**Palavras-Chave**—Redes ópticas WDM, comunicações ópticas, comutação óptica de pacotes, modelos de tráfego com dependência temporal.

## I. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de redes completamente ópticas possibilitou o surgimento de novas técnicas de comutação além de contribuir para a redução dos custos de transmissão e implementação de novos serviços. Nestas redes, puramente ópticas e comutadas, a multiplexação é realizada em comprimento de onda (WDM - *wavelength division multiplexing*) sem conversão para o meio eletrônico no interior da rede.

Os principais tipos de comutação adotados para as futuras redes ópticas WDM são baseados na comutação de caminhos (circuitos) de luz ou comprimentos de onda, de pacotes (OPS-*Optical Packet Switching*) [1] [2] [3] [4] e de rajadas (OBS-*Optical Burst Switching*) [5] [6] [7] [8]. Na comutação por comprimentos de onda, um circuito óptico é estabelecido e fica reservado durante toda a existência da comunicação, mesmo que não haja transmissão, acarretando em desperdício de banda passante do enlace. Com a comutação de pacotes, o comprimento de onda só é atribuído ao pacote em uma fração do tempo (*slot*), enquanto este trafega pela rede. Isso otimiza a utilização do enlace óptico (i.e., banda passante), sendo esta uma das principais vantagens da comutação de pacotes. Além disso, na comutação de pacotes há a flexibilidade na taxa de transmissão e mais fontes podem compartilhar o mesmo meio físico. O principal desafio da comutação de pacotes é a gerência da contenção ou congestionamento [9] [3]. No meio eletrônico a contenção é resolvida através de memórias RAM, no entanto, as RAMs ópticas ainda não estão disponíveis [10]. A contenção pode então ser resolvida através de *buffers* ópticos, implementados com FDLs e conversores

de comprimento de onda fixos (FWC - *fixed wavelength converter*) ou sintonizáveis (TWC - *tunable wavelength converter*). Dependendo do tipo de comutação óptica utilizada, serão necessários dispositivos capazes de operar em altas velocidades. Além disso, deve-se considerar o alto custo e volume desses dispositivos. Os dispositivos ópticos, como portas e conversores de comprimento de onda, estão sendo aprimorados, e os atualmente disponíveis, ainda trazem muitas restrições à implementação de redes ópticas comutadas [10]. Essas restrições estão relacionadas a velocidade de comutação e a degradação do sinal óptico. A degradação deve ser minimizada de forma a possibilitar a recuperação da informação contida no sinal óptico, mesmo com vários dispositivos ligados em série. Em [9] são apresentados os principais parâmetros de avaliação de desempenho em termos de degradação do sinal óptico em comutadores ópticos assim como os principais dispositivos ópticos utilizados nas matrizes de comutação.

A comutação de rajadas [11] [12] foi proposta como solução intermediária, evitando os problemas de gerência de contenção nas FDLs. Na comutação de rajadas o armazenamento e conversão são removidos para a borda da rede. A rajada é montada por uma longa cadeia de bits com número de origem e destino em comum. Durante a montagem é feita a reserva de um comprimento de onda. Tão logo a rajada seja transmitida, o comprimento de onda é liberado para outra conexão. Na comutação de rajadas não se consegue utilizar a banda passante de forma otimizada como na comutação de pacotes, mas há uma melhora quando comparada à comutação de comprimento de onda.

Em [13] estudamos o desempenho de comutadores ópticos de rajadas no suporte ao tráfego de vídeo com dependência temporal. Naquele trabalho propusemos um esquema de montagem de rajadas (*FtB-frame to burst*) a partir de quadros de vídeo, além de apresentar e validar os modelos de tráfego de vídeo. Em [14] introduzimos no estudo a avaliação de desempenho de comutadores ópticos de pacotes. O objetivo deste trabalho é dimensionar e avaliar o desempenho do *buffer* óptico para a comutação de pacotes com presença de dependência temporal (parâmetro de Hurst ou  $H$ ). Além disso, fazemos uma comparação com os resultados encontrados em [3] e [15], quando o autor não considera a característica do tráfego, utilizando apenas um modelo de carga no estudo.

O grau de dependência temporal foi encontrado em diversas áreas da ciência como economia, agronomia, engenharia [16]. Portanto, é fundamental avaliar o impacto desta dependência entre pacotes na contenção óptica. Além disso, foram avaliadas medidas de atraso e *jitter*. No estudo, verifica-se também se o parâmetro  $H$  dos sinais avaliados no experimento, se mantém após o armazenamento, ou seja, se o tamanho do *buffer* influ-

Etelmar Santos Jr e Rosângela Coelho, Departamento de Engenharia Elétrica, Laboratório de Redes de Comunicações e Sistemas Ópticos, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, Brasil, E-mail: coelho@ime.eb.br. Este trabalho foi parcialmente financiado pela FAPERJ (E.00/123450-6) e pelo *University Research Program* grant da CISCO.

ência no parâmetro  $H$ . Os sinais de tráfego com dependência temporal são representados pelos modelos  $M/G/\infty$  (restrito) [17] e o fBm (não restrito) [18]. A restrição está relacionada a capacidade dos modelos de representar a faixa de grau de dependência temporal ( $0 < H < 1$ ).

O restante do trabalho está organizado da seguinte forma: na seção II é apresentado o fenômeno da contenção na comutação óptica de pacotes e as formas de resolvê-la. A seção III introduz sucintamente os modelos de tráfego e a seção IV mostra o modelo proposto para a avaliação. Na seção V são apresentados os resultados das simulações. Finalmente, na seção VI é concluído este trabalho.

## II. CONTENÇÃO EM OPS

A Fig. 1 ilustra a arquitetura genérica do comutador óptico de pacotes, com as FDLs e conversores de comprimento de onda, considerada nesse trabalho. Esta arquitetura é denominada *feed-forward*, onde os pacotes de cada entrada, em distintos comprimentos de onda, são enviados em direção as saídas através de um conjunto de FDLs. Cada pacote passará por uma FDL, conforme o retardo necessário a ser aplicado ao pacote. De uma maneira geral, o *buffer* pode ser implementado na entrada do comutador, na saída ou em ambos [10] [19]. A implementação do *buffer* na entrada do comutador causa o bloqueio denominado de cabeça de linha (HOL - *head-of-line blocking*). Este bloqueio ocorre quando o pacote que está na frente de uma determinada fila ainda não pode ser atendido, impedindo a passagem dos demais pacotes, que estão atrás dele na mesma fila. O HOL pode ser contornado em *buffers* eletrônicos selecionando-se outro pacote que não esteja na cabeça da fila. Entretanto esta é uma solução complicada no meio óptico e de implementação inviável [10]. Na arquitetura *broadcast-and-select* implementada no projeto KEOPS (*Keys to Optical Packet Switching*) [1] [2] [20], os pacotes das distintas entradas são convertidos para diferentes comprimentos de onda e replicados para todas as FDLs em cada saída. Em seguida, através de portas ópticas, seleciona-se o pacote desejado conforme o destino.

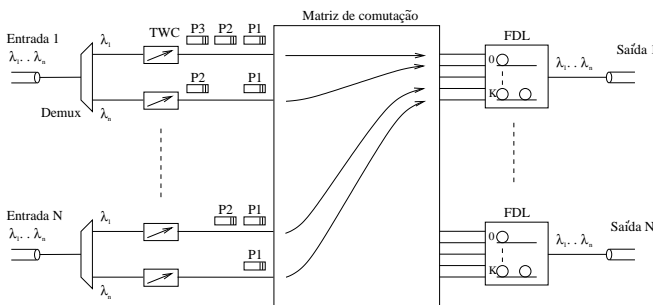


Fig. 1. Arquitetura genérica de um comutador OPS

Os *buffers* ópticos são implementados na saída do comutador através de FDLs e são classificados em *feedback* e *feed-forward*. Na implementação *feedback*, também denominada *buffer de re-circulação*, as FDLs interligam as saídas do

comutador às suas entradas, fazendo o pacote re-circular no comutador com um pequeno retardo. Cada vez que houver uma contenção, o pacote poderá re-circular pelo comutador, passando pela FDL. Na re-circulação há degradação do sinal óptico, na FDL e principalmente nas portas de comutação.

Na implementação *feed-forward* são  $K + 1$  FDLs associadas a cada porta de saída. A  $FDL_i$  é composta de  $i$  unidades básicas de retardo (u.b.). Nessa arquitetura a matriz de comutação deve ter  $N \times n$  entradas por  $N \times (K + 1)$  saídas, e são necessários  $n$  distintos comprimentos de onda internamente. O pacote passa por uma FDL, entre as várias FDLs que estão associadas a saída do comutador óptico. A matriz de comutação direciona o pacote para apenas uma das FDLs de  $K$  FDLs, conforme o retardo necessário a se aplicar ao pacote. O sinal óptico é atenuado de forma praticamente homogênea pois os pacotes passam pelo mesmo número de portas ópticas, na matriz de comutação, independente do tamanho da FDL. Esse é o principal motivo de se optar pela arquitetura *feed-forward*, ao invés da *feedback*, na implementação de comutadores ópticos de pacotes [10].

Em uma rede WDM os pacotes ópticos poderão ter duração fixa ou variável. Para simplificar a análise, utilizou-se pacotes com duração fixa. O pacote óptico é formado por um cabeçalho e um campo de informação e tem duração de  $424 \times \frac{1}{2.5 \times 10^9} = 169.6 \times 10^{-9} s$ . Este valor corresponde a 424 bits em uma taxa de 2.5 Gbps. A u.b. para armazenar o pacote deve ter um comprimento de  $\frac{c}{\eta \times C} = 33.92 m$ , onde  $c = 3 \times 10^8 m/s$  é a velocidade da luz,  $\eta = 1.5$  é o índice de refração na fibra,  $b$  é a quantidade de bits e  $C = 2.5$  Gbps é a taxa de enlace óptico. Assim neste estudo as FDLs têm comprimentos múltiplos de  $u.b. = 33.92 m$ , ou seja, a  $i$ -ésima FDL será composta de  $i$  u.b. e terá  $i \times 33.92 m$ . Entre cabeçalho, campo de informação e pacotes adjacentes há um intervalo de guarda para evitar a sobreposição de bits na detecção do sinal [10] [20]. O campo de informação permanece todo o tempo no meio óptico, enquanto o cabeçalho, após ser extraído, é convertido pois a unidade de controle ainda é eletrônica. Logo, o cabeçalho e o campo de informação são codificados em taxas diferentes.

Cada entrada do comutador multiplexa diferentes comprimentos de onda (WDM), que no codificador de comprimento de onda é convertido por um conversor fixo ou sintonizável, conforme a saída destino. A unidade de controle aciona as portas ópticas na matriz de comutação conforme o destino de cada pacote, com a informação extraída de seu cabeçalho.

Quando dois ou mais pacotes, em um comutador óptico de pacotes, estão direcionados à mesma porta de saída, no mesmo instante, apenas um será comutado e os demais são bloqueados ou perdidos. Este fenômeno é denominado de contenção por congestionamento sendo o principal desafio das redes comutadas por pacotes (eletrônicas ou ópticas). A solução geralmente adotada para resolver o problema de contenção em comutadores eletrônicos é o armazenamento temporário dos pacotes em um *buffer* (memória RAM) até

<sup>1</sup>As portas ópticas são elementos que funcionam como uma chave "liga-desliga". Além disso, a degradação do sinal óptico não será homogênea, pois dependerá do número de re-circulações de cada pacote [10].

<sup>2</sup>A FDL  $K_0$  tem comprimento infinitesimal e não retarda o pacote.

que a porta de saída esteja livre. Uma interessante solução é o uso em conjunto de conversores de comprimentos de onda com FDLs. Assim, pode-se reduzir consideravelmente o número de conversores de comprimento de onda, obtendo-se uma arquitetura óptica mais simples, com baixo custo e desempenho melhor.

O *buffer* óptico, além de resolver a contenção, é também útil para retardar o pacote enquanto o cabeçalho é processado na interface de entrada da rede. Nesse caso, geralmente um tempo fixo é suficiente e pode ser implementado de forma simples.

### III. MODELOS DE TRÁFEGO COM DEPENDÊNCIA TEMPORAL

Para dimensionar e avaliar o desempenho do *buffer* óptico é necessário um modelo analítico adequado para caracterizar o sinal de tráfego que representará as chegadas de pacotes ópticos. Um modelo de tráfego deve representar as estatísticas de primeira e segunda ordens, e ser tratável analiticamente na teoria baseada em filas. A utilização de filas é fundamental pois estamos dimensionando o *buffer* óptico.

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*) ( $H = \frac{1}{2}$ ) e com dependência de longo alcance (LRD - *long range dependence*) ( $H > \frac{1}{2}$ ).

Os modelos de tráfego  $M/G/\infty$  e fBm apresentam distribuição de cauda pesada (DCP) e são considerados como limitantes superiores (fBm) e inferiores ( $M/G/\infty$ ) em termos de desempenho [21] e [22]. Por definição, dizemos que a variável aleatória  $X$  tem distribuição de cauda pesada se  $P(X > x) \cong qx^{-\alpha}$ ,  $x \rightarrow \infty$ , onde  $0 < \alpha < 2$  é o parâmetro de forma e  $q$  é uma constante positiva.

#### A. $M/G/\infty$

O processo  $M/G/\infty$  [17] é representado por um servidor infinito com chegada Poisson de taxa média  $\lambda$  e tempo de serviço com distribuição  $G$  ( $P[Z > t]$ ). Assim temos:

$$P[Z > t] = \frac{\gamma(t) - \gamma(t+1)}{1 - \gamma(1)}, \quad t = 0, 1, \dots \quad (1)$$

onde  $\gamma(t)$  é a função autocorrelação do processo  $Z(t)$ . A autocorrelação de  $M/G/\infty$  é definida por  $\Gamma(t) = \delta^2 \gamma_H(t)$ ,  $t = 0, 1, \dots$  onde  $H = 1 - \beta/2$  e  $\beta$  ( $0 < \beta < 1$ ) e  $\delta^2$  são constantes.

Para conseguir a representação do grau de dependência positivo o processo  $M/G/\infty$  ( $Z_H(t)$ ) deve ter uma FAC decrescente ( $\gamma_H(t)$ ) com  $\gamma_H(0) = 1$ . Então,

$$\gamma_H(t) \sim H(2H - 1)t^{2H-2}, \quad t \rightarrow \infty \quad (2)$$

Para encontrar a distribuição do tempo de serviço  $G$ , consideremos a definição da função autocorrelação:

$$P[Z_H > z] = \frac{|z+2|^{2H} - 3|z+1|^{2H} + 3|z|^{2H} - |z-1|^{2H}}{4(1 - 2^{2H-2})}, \quad z = 1, 2, \dots \quad (3)$$

O  $M/G/\infty$  também considera que a FAC ( $\rho(k)$ ) da seqüência de vídeo é

$$\rho(k) = e^{-\beta\sqrt{k}}, \quad k = 0, 1, 2, \dots \quad (4)$$

O parâmetro  $\beta$  é estimado à partir de uma seqüência de vídeo real. A distribuição  $G$  é relacionada à função autocorrelação pela expressão:

$$P[Z = k] = \frac{\rho(k-1) - 2\rho(k) + \rho(k+1)}{1 - \rho(1)} \quad (5)$$

As amostras do processo  $M/G/\infty$  são obtidas através de uma transformação da distribuição Poisson para uma híbrida Gamma ( $F_G$ )/Pareto ( $F_P$ ) ( $F_{PGP}$ ) mantendo a FAC (Eq. 4) estimada da seqüência de vídeo; ou seja, dado um  $x^* > 0$

$$F_{PGP} = \begin{cases} F_G(x) & x \leq x^* \\ F_P(x) & x > x^* \end{cases}$$

#### B. *fractional Brownian motion*

O fBm [23] é um processo estocástico gaussiano ( $X(t)$ ) de parâmetro contínuo  $t$ . O fBm tem média nula e incrementos estacionários, independentes, cuja variância é proporcional ao intervalo de tempo entre eles, conforme a equação

$$\text{Var}[X(t_2) - X(t_1)] \propto |t_2 - t_1|^{2H}, \quad (6)$$

para  $0 \leq t_1 \leq t_2$ . O fBm é auto-similar com parâmetro  $H$ , ou seja, suas características estatísticas se mantêm para qualquer escala no tempo. Para quaisquer  $\tau$  e  $r > 0$ ,

$$[X_H(t+\tau) - X_H(t)]_{\tau \leq 0} \stackrel{d}{\approx} r^{-H} [X_H(t+r\tau) - X_H(t)]_{\tau \leq 0} \quad (7)$$

onde  $r$  é o fator de escala do processo e  $\stackrel{d}{\approx}$  significa semelhante em distribuição. Como  $X_H(t)$  é um processo gaussiano, é completamente caracterizado por sua média e FAC que é dada por

$$\rho(k) = \frac{1}{2} \sigma^2 [(k+1)^{2H} - 2k^{2H} + (k-1)^{2H}]. \quad (8)$$

Norris [18] propôs uma discretização que permite que um modelo fBm gere um processo ( $A(t)$ ) com características em escala e média e variância não nulas. Tomando  $A(t)$  como sendo o número de pacotes recebidos por um multiplexador a  $t$  e o instante  $t$ , temos

$$A(t) = mt + \sqrt{am} X_H(t), \quad (9)$$

onde  $m$  é a taxa média de chegada e  $a = \text{Var}[A(t)]/(mt)^{2H}$  a variância.

### IV. MODELO DE AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DO COMPUTADOR OPS

As Figs. 2 e 3 ilustram os modelos com um e vários comprimentos de onda por saída, respectivamente. Estes modelos foram avaliados por simulação. Para a avaliação foi considerado o impacto das FDLs na contenção de perdas pacotes (PLR - *packet loss rate*) e ainda o retardo e *jitter*. A utilização de FDLs e conversores de comprimento de onda no comutador foi apresentado em [3], mas sem considerar o tráfego com dependência temporal. As FDLs são construídas utilizando-se fibras ópticas, que introduzem um retardo de

$5\mu s$  por quilômetro. Na análise será considerado inicialmente um comprimento de onda (um servidor) e uma saída destino, e posteriormente, vários comprimentos (vários servidores) de onda por saída destino. O pacote ao chegar é direcionado à menor FDL disponível na sua saída destino, ou convertido para outro comprimento de onda para ser inserido na menor FDL disponível.

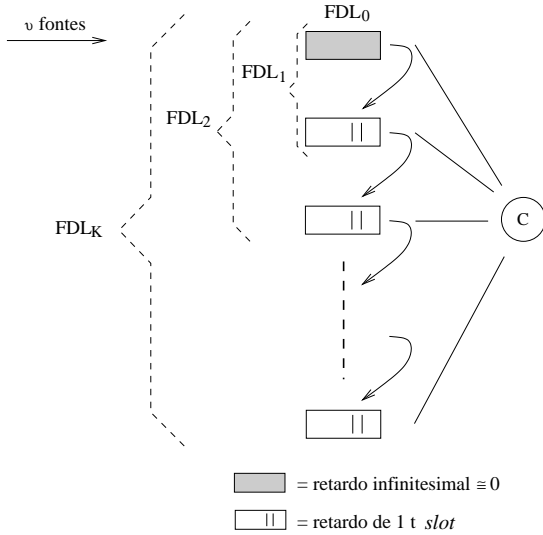


Fig. 2. Modelo de avaliação do comutador OPS com um comprimento de onda

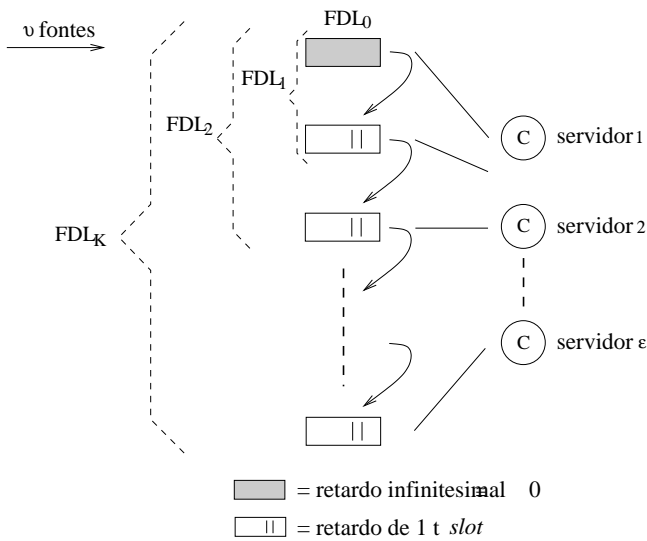


Fig. 3. Modelo de avaliação do comutador OPS com vários comprimentos de onda

Ao sair da FDL, se o servidor (a porta destino) estiver liberado, o pacote é atendido, caso contrário, é descartado. Se após as  $k$  chances restantes, o pacote não for atendido, será computado uma perda.

O retardo introduzido por cada FDL é um inteiro múltiplo da taxa de atendimento do pacote, ou slot de tempo, usado na

simulação, ou seja,  $169.6 \times 10^{-9}$ . Assim as FDLs ficaram com comprimentos múltiplos de  $u.b. = 33.92 m$ , ou seja, a  $i$ -ésima FDL será composta de  $i$  u.bs. e terá  $i \times 33.92 m$ . Se o buffer óptico de uma das saídas do comutador ilustrado na Fig. 1 tem  $K$  FDLs, isso corresponde a  $1 + 2 + \dots + K = \frac{(K+1)K}{2}$  u.bs..

Como veremos na seção V o retardo introduzido pelas FDLs atenderá, dentro de certos limites, aos requisitos dos serviços de vídeo [24], mesmo que o pacote passe por vários comutadores.

Devido a restrições de simulação, usamos a taxa de atendimento de 2.5 Gbps, apesar da taxa na fibra alcançar valores superiores a 10 Gbps por comprimento de onda. Na taxa escolhida, fizemos o estudo para perdas de  $10^{-4}$  e verificamos o comportamento do *jitter*, retardo e  $H$ , conforme a seção seguinte.

## V. RESULTADOS

Nos experimentos realizados foram utilizados os parâmetros de seqüências de vídeo reais geradas pelos modelos  $M/G/\infty$  e fBm. Geralmente, os sinais de vídeo apresentam dependência temporal intrínseca ao processo de codificação. As seqüências utilizadas foram a *StarWars* (JPEG), *Silence of the Lambs* (*Silence*) (H.263) e *Race* (MPEG-1), cujos parâmetros média ( $m$ ), desvio padrão ( $\sigma$ ) e  $\hat{H}$  estão na Tab. I. Em [14] foi demonstrado que estes modelos são adequados para representar a distribuição de cauda pesada, FAC e parâmetro  $H$  de sinais de tráfego de vídeo.

TABELA I  
PARÂMETROS DAS SEQÜÊNCIAS DE VÍDEO.

Seqüência	$m$ (kbits/s)	$\sigma$ (kbits/s)	$\hat{H}(R/S)$	$\hat{H}(AV)$
<i>StarWars</i> (JPEG)	5335.8	1200.8	0.830	0.828
<i>Silence</i> (H.263)	891.6	344.09	0.822	0.820
<i>Race</i> (MPEG-1)	1804.8	537.79	0.870	0.888

Para estimar a variação do parâmetro  $H$  foram utilizados os estimadores Rescaled/Statistics (R/S) e AV-Wavelet (*Abry-Veitch*), do pacote HEP (*Hurst Estimator Package*) [25]. O AV-Wavelet apresenta menor complexidade devido seu rápido algoritmo de estimação. Vários resultados de estimação e discussões sobre dependência em tráfegos de vídeo são apresentados em [26]. A Tab. I mostra também os parâmetros  $H$  ( $\hat{H}$ ) estimados a partir das seqüências de vídeo reais. Nota-se que as seqüências apresentam características LRD, pois o modelo  $M/G/\infty$  só pode representar graus de dependência positivos, ou seja,  $H > 1/2$ . Além disso, espera-se que este grau de dependência temporal possa causar impacto no processo de armazenamento óptico e no desempenho do comutador. Fontes com  $H \leq 1/2$ , apresentando o efeito de anti persistência [27] [28] são fortemente centradas em torno da taxa média e por isso esperamos um melhor desempenho da fila quando comparado a fontes LRD.

A. Resultados de PLR considerando diversos tamanhos de FDLs e conversores de comprimento de onda

A Fig. 4 apresenta os resultados de PLR em função de número de FDLs considerando apenas um comprimento de

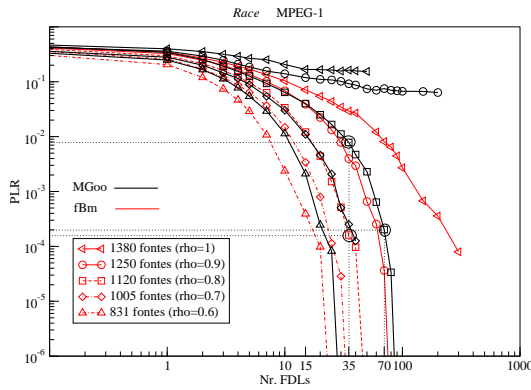


Fig. 4. PLR x FDL para a seqüência *Race* (MPEG-1)  $M/G/\infty$  e fBm com um comprimento de onda.

onda, para a seqüência *Race* (MPEG-1). Como pode-se observar, os resultados demonstram o impacto do tipo de modelo de tráfego no grau de contenção em termos de PLR. Esse impacto deve-se a distribuição de cauda pesada dos modelos de tráfego, uma vez que os modelos têm os mesmos parâmetros de média, variância e  $H$ . Por exemplo, para uma taxa de utilização ( $\rho$ ) de 0.8 (1120 fontes multiplexadas), foram necessárias 35 FDLs para se obter uma PLR de  $10^{-4}$  quando se utiliza o modelo fBm. No entanto com as mesmas 35 FDLs a PLR é de  $10^{-3}$  quando se utiliza o modelo  $M/G/\infty$  e são necessárias 70 FDLs para se obter a PLR de  $10^{-4}$ . Este impacto também foi observado para outras seqüências.

Para reduzir o número de FDLs necessárias, manter a mesma PLR para diferentes fatores de utilização, utilizam-se conversores de comprimento de onda para resolver a contenção. Na FIG. 5 podemos observar que quando se utiliza 1 comprimento de onda são necessárias 70 FDLs para se conseguir multiplexar 1120 fontes *Race* (MPEG-1) gerada com o modelo  $M/G/\infty$  e obter uma  $PLR = 10^{-4}$ . Com dois comprimentos de onda, são necessárias apenas 5 FDLs. E com 4 comprimentos de onda, 1 FDL já é suficiente para alcançar a PLR de  $10^{-4}$ . Com 5 comprimentos de onda não é necessário utilizar as FDLs, obtendo-se uma PLR menor que  $10^{-4}$ . Na Tab. II pode-se observar que o mesmo acontece com outras seqüências. Com a seqüência *Silence* fBm por exemplo, o número de FDLs necessárias é reduzido de 20 para 1, quando se utiliza 4 comprimentos de onda, para uma PLR de  $10^{-4}$  e  $\rho = 0.8$ . Na FIG. 6 podemos observar o resultado da PLR pelo número de FDLs, quando se alimenta o comutador óptico com 1120 fontes *Race* (MPEG-1) geradas com o modelo fBm. Quando se utiliza 1 comprimento de onda são necessárias 35 FDLs para se obter  $PLR = 10^{-4}$ . Com dois comprimentos de onda, são necessárias apenas 4 FDLs. E com 4 comprimentos de onda, 1 FDL já é suficiente para se conseguir uma PLR de  $10^{-4}$ . A utilização de 7 comprimentos de onda dispensa o uso das FDLs, obtendo-se uma PLR menor que  $10^{-5}$ . Com 8 comprimentos de onda, a  $PLR \cong 0$ .

A Tab. II mostra o número de FDLs e conversores de comprimento de onda necessários para se obter uma PLR de  $10^{-4}$  com  $\rho = 0.8$  para os modelos  $M/G/\infty$  e fBm e diferentes seqüências. Na Tab. II o número total de u.bs. por saída está ao lado do número de FDLs.

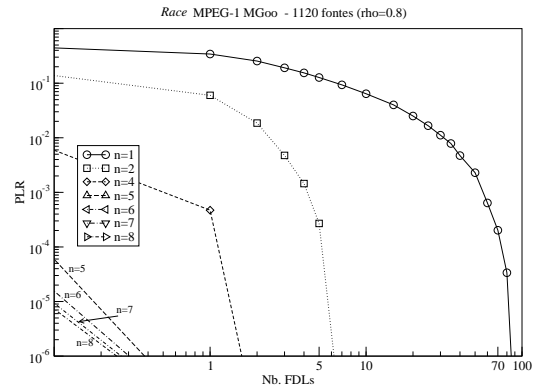


Fig. 5. PLR em função do número de FDLs necessárias para a seqüência *Race* (MPEG-1)  $M/G/\infty$ , com  $\rho = 0.8$  e diversos comprimentos de onda ( $n$ ).

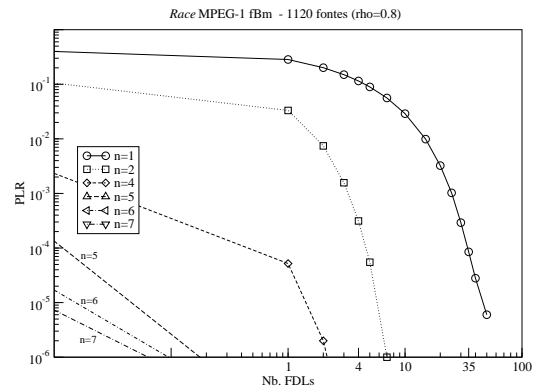


Fig. 6. PLR em função do número de FDLs necessárias para a seqüência *Race* (MPEG-1) fBm, com  $\rho = 0.8$  e diversos comprimentos de onda ( $n$ ).

Na Tab. II também apresentamos os resultados obtidos em [3] considerando apenas um "modelo de carga" e podemos verificar a importância de se considerar o modelo de fonte. Por exemplo, se fosse utilizado apenas um modelo de carga seriam necessárias apenas 15 FDLs e um comprimento de onda para se obter uma PLR de  $10^{-4}$  com  $\rho = 0.8$ . No entanto quando se considera o modelo de tráfego são necessárias de 20 a 90 FDLs, dependendo do modelo utilizado. Também deve ser observado que para diferentes seqüências de um mesmo modelo há diferentes requisitos de número de FDLs para se conseguir a mesma PLR de  $10^{-4}$  com o mesmo  $\rho = 0.8$ . Por exemplo, nessas condições e para um comprimento de onda, são necessárias 50 FDLs quando se avalia o comutador com a seqüência *StarWars*  $M/G/\infty$ . No entanto, com a seqüência *Silence* do mesmo modelo são necessárias 90 FDLs para se obter o mesmo desempenho.

Em resumo, pelas curvas e tabelas acima, pudemos verificar que a utilização de comprimentos de onda na resolução da contenção no comutador óptico de pacotes reduz consideravelmente o número de FDLs necessários para se obter uma determinada perda, no caso  $10^{-4}$ . Também há um limite do número máximo de sete comprimentos de onda, acima do qual, o desempenho praticamente não é alterado. Isso pode ser verificado na FIG.5 com a seqüência *Race*. Como o custo de conversores de comprimento de onda é alto, deve ser ressaltado que a utilização destes em conjunto com as FDLs ainda é a

TABELA II

NÚMERO DE FDLs NECESSÁRIAS PARA SE OBTER  $PLR=10^{-4}$  COM  $\rho = 0.8$  E MODELOS  $M/G/\infty$  E fBm (U.B.=33.92 m) PARA VÁRIOS COMPRIMENTOS DE ONDA.

Seqüência c.onda	Número de FDLs (u.b.=33.92 m)				
	$M/G/\infty$	fBm	"carga"		
StarWars	1	50 (1275 = 43.25 Km)	20 (210 = 4.8 Km)	15	
	2	5 (15 = 0.51 Km)	4 (10 = 0.33 Km)	3	
	4	1 (1 = 0.03 Km)	1 (1 = 0.03 Km)	1	
Silence	1	90 (4095 = 139 Km)	20 (210 = 4.8 Km)	15	
	2	4 (10 = 0.33 Km)	3 (6 = 0.20 Km)	3	
	4	1 (1 = 0.03 Km)	1* (1 = 0.03 Km)	1	
Race	1	70 (2485 = 84.3 Km)	35 (576 = 21.37 Km)	15	
	2	5 (15 = 0.51 Km)	4 (10 = 0.33 Km)	3	
	4	1 (1 = 0.03 Km)	1 (1 = 0.03 Km)	1	

melhor alternativa de arquitetura de *buffer* óptico.

### B. Resultados de jitter, retardo e variação de H

A TAB. III ilustra o número de fontes multiplexadas, o fator de utilização  $\rho$ , o retardo médio, o *jitter* máximo e os valores do parâmetro  $H$  estimados na saída do comutador óptico, para uma PLR de  $10^{-4}$ , um comprimento de onda e 50 FDLs, obtidos com os modelos  $M/G/\infty$  e fBm. Com 50 FDLs, o que equivaleria a 1696.0 m de fibra óptica, o retardo máximo é de  $8.48 \times 10^{-6}$  s. O retardo médio e o *jitter* máximo no comutador ficam, no pior caso, em  $1.63 \times 10^{-6}$  s e  $8.47 \times 10^{-6}$  s, respectivamente. Ao se comparar o parâmetro  $H$  estimado na saída do comutador com os apresentados na TAB. I, observa-se que não sofreram alterações consideráveis no processo de comutação e armazenamento óptico.

TABELA III

RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES PARA 50 FDLs (1696.0 M DE FIBRA ÓPTICA, COM RETARDO MÁXIMO DE  $8.48 \times 10^{-6}$  s), UM COMPRIMENTO DE ONDA E  $PLR 10^{-4}$

Seqüência	nr fontes	$\rho$	<i>jitter</i> máx.( $\mu$ s)	retardo médio( $\mu$ s)	$\hat{H}(AV)$	$\hat{H}(R/S)$
StarWars $M/G/\infty$	360	0.8	8.31	1.41	0.840	0.849
Silence $M/G/\infty$	2010	0.7	7.97	1.10	0.839	0.839
Race $M/G/\infty$	1005	0.7	7.60	0.89	0.892	0.895
StarWars fBm	447	1.0	8.31	1.57	0.841	0.831
Silence fBm	2800	1.0	7.46	1.38	0.821	0.822
Race fBm	1250	0.9	8.47	1.63	0.862	0.869

A TAB. IV ilustra o número de fontes multiplexadas, o  $\rho$ , o retardo médio, o *jitter* máximo e os valores do parâmetro  $H$  estimados na saída do comutador óptico, para uma PLR de  $10^{-4}$ , dois comprimentos de onda e 5 FDLs, obtidos com os modelos  $M/G/\infty$  e fBm.

Com 5 FDLs, o retardo médio e o *jitter* máximo no comutador ficam, no pior caso, em  $8.40 \times 10^{-7}$  s e  $8.48 \times 10^{-7}$  s, respectivamente. Os valores de retardo médio e *jitter* máximo encontrados na Tab. IV são muito inferiores aos encontrados na TAB.III. Isso deve-se ao fato de se reduzir o número de FDLs necessárias no comutador óptico. Quanto ao parâmetro  $H$  estimado na saída do comutador, comparando-os com os apresentados na TAB. I, observamos que, também neste caso, não sofreram alterações relevantes no processo de comutação e armazenamento óptico. Além disso, os resultados

TABELA IV

RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES PARA 5 FDLs (169.6 m DE FIBRA ÓPTICA, COM RETARDO MÁXIMO DE  $8.48 \times 10^{-7}$  s), DOIS COMPRIMENTOS DE ONDA E  $PLR 10^{-4}$

Seqüência	nr fontes	$\rho$	<i>jitter</i> máx.( $\mu$ s)	retardo médio( $\mu$ s)	$\hat{H}(AV)$	$\hat{H}(R/S)$
StarWars $M/G/\infty$	404	0.9	0.84	0.24	0.840	0.841
Silence $M/G/\infty$	2500	0.9	0.84	0.24	0.832	0.824
Race $M/G/\infty$	1120	0.8	0.84	0.23	0.883	0.884
StarWars fBm	447	1.0	0.22	0.84	0.841	0.831
Silence fBm	2800	1.0	0.84	0.22	0.841	0.831
Race fBm	1380	1.0	0.84	0.23	0.868	0.876

TABELA V

REQUISITOS DE QOS PARA APLICAÇÕES DE VÍDEO [24].

Aplicação	Retardo (ms)	<i>jitter</i> (ms)
Vídeo conferência - 64 Kbps	300	130
Vídeo NTSC MPEG 1.5 Mbps	5	6.5
Vídeo HDTV 20 Mbps	0.8	1

de retardo médio e *jitter* máximo encontrados, atendem aos requisitos dos serviços de vídeo ( $\mu$ s), conforme a TAB.V.

Mesmo nos casos em que se usou as seqüências geradas pelo modelo  $M/G/\infty$ , consegue-se atender aos requisitos de retardo e *jitter* [24]. Também observamos que o  $H$  não variou em todas as simulações.

## VI. CONCLUSÕES

Neste trabalho examinamos a contenção em comutadores ópticos de pacotes. A contenção foi baseada no dimensionamento de um *buffer* óptico composto de FDLs (*fiber delay lines*) e/ou conversores de comprimento de onda. Os modelos  $M/G/\infty$  e fBm foram considerados na caracterização de tráfego com dependência temporal na entrada de cada porta óptica. Os resultados demonstraram que a distribuição do tráfego é um ponto crítico no desempenho dos comutadores e no dimensionamento dos *buffers* ópticos, e portanto, na contenção óptica. Também verificamos que o grau de dependência temporal não foi afetado pelo processo de armazenamento nas FDLs. Dentro de certos limites (para fatores de utilização de até 90%) o impacto causado pelas FDLs no *jitter*, retardo e  $H$  é irrelevante. A utilização de conversores de comprimento de onda reduz substancialmente o número de FDLs necessárias na resolução de contenção. Porém, há um limite do número máximo de conversores que deve ser usado, acima do qual, o desempenho não se altera.

## REFERÊNCIAS

- [1] L. Xu, H. Perros, and G. Rouskas, "Techniques for Optical Packet Switching and Optical Burst Switching," *IEEE Communications Magazine*, pp. 136–142, January 2001.
- [2] e. a. Guillemot, C., "Transparent Optical Packet Switching: The European ACTS KEOPS Project Approach," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 16, pp. 2117–2132, December 1998.
- [3] S. L. Danielsen, P. Hansen, and K. Stubkjaer, "Wavelength Conversion in Optical Packet Switching," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 16, pp. 2095–2108, December 1998.
- [4] M. Renaud, C. Guillemot, and B. Bostica, "Network and System Concepts for Optical Packet Switching," *IEEE Communications Magazine*, pp. 96–102, April 1997.

- [5] M. D'user and P. Bayvel, "Analysis of a Dynamically Wavelength-Routed Optical Burst Switched Network Architecture," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 20, pp. 574–585, April 2002.
- [6] E. Sirén and E. Hyttiä, "Delay Line Configurations in Optical Burst Switching with JET Protocol," Tech. Rep. TD(02)24, COST279, May 2002.
- [7] K. Dolzer and C. Gauger, "On Burst Assembly in Optical Burst Switching Networks-A Performance Evaluation of Just-Enough-Time," *Proceedings of the 17th International Teletraffic Congress*, pp. 149–160, December 2001.
- [8] M. Yoo and C. Qiao, "A New Optical Burst Switching Protocol for Supporting Quality of Service," *Proceedings of the SPIE*, vol. 3531, pp. 396–405, November 1998.
- [9] G. Papadimitriou, C. Papazoglou, and A. Pomportsis, "Optical Switching: Switch Fabrics, Techniques, and Architectures," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 21, pp. 384–405, February 2003.
- [10] R. Ramaswami and K. Sivarajan, *Optical Networks, A Practical Perspective*. USA: Morgan Kaufmann Publishers, 2nd Edition, 2002.
- [11] P. Boyer and D. Tranchier, "A Reservation Principle with Applications to the ATM Traffic Control," *Computer Network and ISDN Systems Journal*, vol. 24, pp. 321–334, 1992.
- [12] C. Qiao and M. Yoo, "Choices, Features and Issues in Optical Burst Switching," *Optical Networks Magazine*, vol. 1, no. 2, pp. 36–44, 2000.
- [13] E. L. Santos and R. F. Coelho, "Optical Buffer and Link Dimensioning to Support Video Traffic with Scaling Characteristics," *Anais do XX Simpósio Brasileiro de Telecomunicações (SBT03)*, pp. 116–121, Outubro 2003.
- [14] E. L. J. Santos and R. F. Coelho, "Optical Packet and Burst Switched Networks Performance for Time-Dependent Video Traffic," *Revista da Sociedade Brasileira de Telecomunicações*, vol. 18, pp. 132–142, outubro 2003.
- [15] S. Danielsen et al, "WDM Packet Switch Architectures and Analysis of the Influence of Tuneable Wavelength Converters on the Performance," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 15, pp. 219–227, February 1997.
- [16] J. Beran, *Statistics for Long-Memory Processes*. Chapman & Hall/CRC, 2nd Edition, 1998.
- [17] M. Krunz and A. Makowski, "Modeling Video Traffic Using M/G/∞ Input Processes: A Compromise Between Markovian and LRD Models," *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. 16, pp. 733–748, June 1998.
- [18] I. Norros, "A Storage Model with Self-Similar Input," *Queueing Systems*, pp. 387–396, 1994.
- [19] M. Hluchyj and M. Karol, "Queueing in High-Performance Packet Switching," *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. 6, pp. 1587–1597, December 1988.
- [20] D. Chiaroni et al, "KEOPS - KEys to Optical Packet Switching," *ACTS Project AC043. Final Report.*, December 1998.
- [21] A. Guimarães and R. Coelho, "Video Traffic Models Performance with Restricted and Non-Restricted Scaling Characterization," *Proceedings of the International Telecommunications Symposium (ITS2002)*, pp. 646–650, September 2002.
- [22] E. L. J. Santos and R. F. Coelho, "Optical Buffer and Link Dimensioning to Support Video Traffic with Scaling Characteristics," *Submitted to the IEEE/GLOBECOM 2003*, 2003.
- [23] B. Mandelbrot and J. Van Ness, "Fractional Brownian Motions, Fractional Noises and Applications," *SIAM Review*, vol. 10, pp. 422–437, October 1968.
- [24] R. Onvural, *Asynchronous Transfer Mode Networks: Performance Issues*. Artech House, 2nd Edition, 1995.
- [25] R. Pontes and R. Coelho, "Admission Control for Video Connections Traffic Streams with Scaling Characteristics," *Revista da Sociedade Brasileira de Telecomunicações (RevSBRT)*, vol. 17, pp. 87–96, Dezembro 2002.
- [26] R. Pontes and R. Coelho, "The Scaling Characteristics of the Video Traffic and its Impact on Acceptance Regions," *Proceedings of the 17th International Teletraffic Congress*, vol. 4, pp. 197–210, December 2001.
- [27] R. Coelho and L. Decreusefond, "Statistical Performance of TV/HDTV Traffic over Broadband Digital Networks," *Proceedings of the IEEE GLOBECOM*, November 1998.
- [28] Q. Li and D. Mills, "Investigating the Scaling Behavior, Crossover and Anti-persistence of Internet Packet Delay Dynamics," *Proceedings of the IEEE GLOBECOM*, pp. 1843–1852, November 2000.