

INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA

EETELMAR LUIZ SANTOS JÚNIOR

**AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE REDES ÓPTICAS COMUTADAS
COM TECNOLOGIA WDM PARA TRÁFEGO COM DEPENDÊNCIA
TEMPORAL**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia Elétrica do Instituto Militar de Engenharia, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Rosângela F. Coelho - Dr. ENST

Rio de Janeiro
2004

c2004

INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA
Praça General Tibúrcio, 80-Praia Vermelha
Rio de Janeiro-RJ CEP 22290-270

Este exemplar é de propriedade do Instituto militar de Engenharia, que poderá incluí-lo em base de dados, armazenar em computador, microfilmar ou adotar qualquer forma de arquivamento.

É permitida a menção, reprodução parcial ou integral e a transmissão entre bibliotecas deste trabalho, sem modificação de seu texto, em qualquer meio que esteja ou venha a ser fixado, para pesquisa acadêmica, comentários e citações, desde que sem finalidade comercial e que seja feita a referencia bibliográfica completa.

Os conceitos expressos neste trabalho são de responsabilidade do(s) autor(es) e do(s) orientador(es).

S237 Santos Júnior, Etelmar Luiz
Avaliação de desempenho de redes ópticas comutadas com tecnologia WDM para tráfego com dependência temporal / Etelmar Luiz Santos Júnior - Rio de Janeiro: Instituto Militar de Engenharia, 2004.
113 p. : il., graf., tab.
Dissertação (mestrado) - Instituto Militar de Engenharia - Rio de Janeiro, 2004
1. Redes ópticas. 2.WDM. 3. Modelos de tráfego de vídeo. 4.Comutação óptica. I. Instituto Militar de Engenharia. II.Título.

CDD 621.3821

A minha família pelo apoio e incentivo em todos os momentos.

Esta dissertação foi desenvolvida no Laboratório de Redes de Comunicações e Sistemas Ópticos (LaRSO) do Departamento de Engenharia Elétrica do IME e é parte integrante do projeto temático "Redes Ópticas WDM" código E-26/171.374/01 da FAPERJ.

AGRADECIMENTOS

A Deus pela oportunidade de evoluir na senda da vida.

Ao Instituto Militar de Engenharia por ter aprimorado a minha formação.

A fundação CAPES pelo apoio financeiro.

A minha orientadora professora Rosângela Fernandes Coelho pela paciência e dedicação intermináveis.

Aos companheiros de IME que compartilharam os momentos de luta.

A minha irmã e meus pais pelo apoio, incentivo e compreensão em todos os momentos.

Aos companheiros da Telemar, Petrobras e Net In Time pelo apoio e compreensão.

Por fim, a todos os professores, alunos e funcionários do Departamento de Engenharia Elétrica do Instituto Militar de Engenharia que, de alguma forma, contribuíram na realização deste trabalho.

SUMÁRIO

LISTA DE ILUSTRAÇÕES	10
LISTA DE TABELAS	12
LISTA DE ABREVIATURAS	14
1 INTRODUÇÃO	18
1.1 Motivação	18
1.2 Objetivos	19
1.3 Principais resultados obtidos	20
1.4 Organização da dissertação	20
2 COMUTAÇÃO ÓPTICA	22
2.1 Introdução	22
2.2 Conceitos e Definições de fibras Ópticas	22
2.3 Comutação de Comprimento de Onda	25
2.4 Comutação Óptica de Pacotes	26
2.4.1 Contenção em Comutação Óptica de Pacotes	29
2.4.2 Arquitetura de comutadores ópticos de pacotes	34
2.5 Comutação Óptica de Rajadas	36
2.6 Parâmetros de Desempenho e Requisitos de QoS para Aplicações de Vídeo	40
2.7 Resumo	41
3 AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE COMUTADORES ÓPTICOS	43
3.1 Introdução	43
3.2 Modelos de tráfego de vídeo com dependência temporal	45
3.2.1 Dependência temporal e Processos Auto-similares	46
3.2.2 Modelo de tráfego baseado no movimento Browniano fracionário	47
3.2.3 Modelo de tráfego baseado no $M/G/\infty$	49
3.3 Modelo de avaliação para o comutador óptico de pacotes	51
3.4 Modelo de avaliação para o comutador óptico de rajadas	55
3.4.1 Modelo Analítico para avaliação do OBS	56
3.5 Comparação entre comutadores OPS x OBS	59

3.6	Resumo	61
4	RESULTADOS DA ANÁLISE DO DESEMPENHO COM OS COMUTADORES ÓPTICOS DE PACOTES E DE RAJADAS	62
4.1	Resultados dos Modelos de Tráfego de Vídeo	63
4.2	Resultados da avaliação de desempenho do Comutador Óptico de pacotes	68
4.2.1	Cenário da análise de desempenho do Comutador Óptico de pacotes	69
4.2.2	Resultados de PLR x FDL no comutador óptico de pacotes com um comprimento de onda	70
4.2.3	Resultados de PLR x FDL no comutador óptico de pacotes com vários comprimentos de onda	75
4.2.4	Resultados de retardo máximo e médio, <i>jitter</i> , parâmetro <i>H</i> e número de pacotes circulantes nas FDLs no comutador óptico de pacotes	80
4.3	Resultados da Avaliação do Desempenho do Comutador Óptico de rajadas	81
4.3.1	Cenário da avaliação de desempenho do comutador óptico de rajadas	83
4.3.2	Resultados de <i>K</i> x PLR do comutador óptico de rajadas	84
4.4	Análise comparativa de desempenho do comutador óptico de pacotes e de rajadas	88
4.5	Resumo	90
5	CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS	91
5.1	Principais Conclusões	91
5.2	Sugestões para Trabalhos Futuros	92
5.3	comentários finais	92
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	93
7	APÊNDICES	99
7.1	APÊNDICE 1: Outras Arquiteturas de comutadores ópticos de pacotes	100
7.1.1	Broadcast and select (KEOPS)	100
7.1.2	Data Vortex	101
7.1.3	WASPNET	102
7.2	APÊNDICE 2: Componentes ópticos	104
7.3	APÊNDICE 3: Algoritmo para Geração de Processo $M/G/\infty$	107
7.4	APÊNDICE 4: Outros Modelos de Tráfego de Vídeo	108
7.4.1	Modelo ARIMA fracionário	108

7.4.2	Fontes On-Off com cauda pesada	109
7.5	APÊNDICE 5: Estimadores do Parâmetro de Hurst	110
7.5.1	Estimador R/S	110
7.5.2	Estimador Higuchi	111
7.5.3	Estimador AV	112

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIG.2.1	Gráfico de Atenuação na fibra óptica (AGRAWAL, 1997).	23
FIG.2.2	Exemplo de formato do pacote (CHIARONI, 1998).	28
FIG.2.3	Exemplo de retardo aplicado aos pacotes pela FDL.	30
FIG.2.4	Implementação de <i>buffer</i> óptico utilizando FDLs com e sem TWC.	30
FIG.2.5	Arquitetura genérica de comutador óptico de pacotes com <i>buffer</i> de re- circulação.	32
FIG.2.6	Arquitetura genérica de comutador óptico de pacotes <i>feed-forward</i>	32
FIG.2.7	Arquitetura genérica de comutador óptico de pacotes com <i>buffer feed- forward</i> compartilhado.	34
FIG.2.8	Arquitetura genérica de comutador óptico de pacotes com conversor de comprimento de onda compartilhado.	35
FIG.2.9	Arquitetura genérica de rede OBS com comutador de borda	37
FIG.2.10	Esquema de montagem da rajada na borda do comutador OBS	39
FIG.3.1	Arquitetura genérica de comutador óptico de pacotes.	52
FIG.3.2	Detalhe de comutador óptico de pacotes e equivalente modelo de fila.	54
FIG.3.3	Modelo do comutador óptico de pacotes com vários servidores usado na análise.	55
FIG.3.4	Arquitetura genérica de rede OBS com comutador de borda	57
FIG.3.5	Modelo do comutador óptico de rajadas considerado na análise de desem- penho.	58
FIG.4.1	FAC para a seqüência <i>StarWars (JPEG)</i>	65
FIG.4.2	FAC para a seqüência <i>Silence (H.263)</i>	65
FIG.4.3	FAC para a seqüência <i>Race (MPEG-1)</i>	66
FIG.4.4	Distribuição para a seqüência <i>StarWars (JPEG)</i>	67
FIG.4.5	Distribuição para a seqüência <i>Silence (H.263)</i>	67
FIG.4.6	Distribuição para a seqüência <i>Race (MPEG-1)</i>	68
FIG.4.7	PLR em função do número de FDLs para a seqüência <i>StarWars (JPEG)</i> $M/G/\infty$	71
FIG.4.8	PLR em função do número de FDLs para a seqüência <i>StarWars (JPEG)</i> fBm.	72

FIG.4.9	PLR em função do número de FDLs para a seqüência <i>Silence</i> H-263 $M/G/\infty$.	73
FIG.4.10	PLR em função do número de FDLs para a seqüência <i>Silence</i> H-263 fBm.	73
FIG.4.11	PLR em função do número de FDLs para a seqüência <i>Race</i> (MPEG-1) $M/G/\infty$	74
FIG.4.12	PLR em função do número de FDLs para a seqüência <i>Race</i> (MPEG-1) fBm.	74
FIG.4.13	PLR em função do número de FDLs necessárias para a seqüência <i>StarWars</i> (JPEG) $M/G/\infty$, com $\rho = 0.8$ e diversos comprimentos de onda (n).	76
FIG.4.14	PLR em função do número de FDLs necessárias para a seqüência <i>StarWars</i> (JPEG) fBm, com $\rho = 0.8$ e diversos comprimentos de onda (n).	77
FIG.4.15	PLR em função do número de FDLs necessárias para a seqüência <i>Silence</i> (H-263) $M/G/\infty$, com $\rho = 0.8$ e diversos comprimentos de onda (n).	77
FIG.4.16	PLR em função do número de FDLs necessárias para a seqüência <i>Silence</i> (H-263) fBm, com $\rho = 0.8$ e diversos comprimentos de onda (n).	78
FIG.4.17	PLR em função do número de FDLs necessárias para a seqüência <i>Race</i> (MPEG-1) $M/G/\infty$, com $\rho = 0.8$ e diversos comprimentos de onda (n).	79
FIG.4.18	PLR em função do número de FDLs necessárias para a seqüência <i>Race</i> (MPEG-1) $M/G/\infty$, com $\rho = 0.8$ e diversos comprimentos de onda (n).	79
FIG.4.19	Arquitetura genérica de rede OBS com comutador de borda	83
FIG.4.20	Resultados analítico e de simulação do desempenho do comutador óptico de rajadas com a seqüência <i>StarWars</i> - fBm.	87
FIG.7.1	Arquitetura genérica do comutador KEOPS	100
FIG.7.2	Esquemático da topologia do <i>Data Vortex</i>	101
FIG.7.3	Arquitetura do comutador WASPNET	103
FIG.7.4	Estimação do parâmetro de Hurst através da estatística R/S para processos com (a) $H = 0.2$, (b) $H = 0.5$ e (c) $H = 0.8$	111
FIG.7.5	Banco de filtros para estimador AV	113

LISTA DE TABELAS

TAB.2.1	Requisitos de retardo e <i>jitter</i> máximos para aplicações de áudio e vídeo	40
TAB.4.1	Parâmetros das seqüências de vídeo originais.	64
TAB.4.2	Parâmetros das seqüências geradas com o modelo $M/G/\infty$	64
TAB.4.3	Parâmetros das seqüências geradas com o modelo fBm.	64
TAB.4.4	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).	75
TAB.4.5	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 $PLR 10^{-4}$	80
TAB.4.6	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 $PLR 10^{-4}$	81
TAB.4.7	Retardo para montagem da rajada na borda.	84
TAB.4.8	Número máximo (analítico) de fontes de vídeo fBm multiplexadas em 10Gbps e 2.5Gbps e $PLR=10^{-3}$	85
TAB.4.9	Número máximo (analítico) de fontes de vídeo fBm multiplexadas em 10Gbps e 2.5Gbps e $PLR=10^{-2}$	85
TAB.4.10	Número máximo (analítico) de fontes de vídeo fBm multiplexadas em 10Gbps e 2.5Gbps e $PLR=10^{-1}$	85
TAB.4.11	Número máximo (simulado) de fontes de vídeo $M/G/\infty$ e fBm multiplexadas em 10Gbps e 2.5Gbps e $PLR=10^{-3}$	86
TAB.4.12	Número máximo (simulado) de fontes de vídeo $M/G/\infty$ e fBm multiplexadas em 10Gbps e 2.5Gbps e $PLR=10^{-2}$	86
TAB.4.13	Número máximo (simulado) de fontes de vídeo $M/G/\infty$ e fBm multiplexadas em 10Gbps e 2.5Gbps e $PLR=10^{-1}$	86
TAB.4.14	Parâmetro (H) das seqüências de vídeo após a montagem da rajada na taxa de 2.5 Gbps.	88
TAB.4.15	Parâmetro (H) das seqüências de vídeo após a montagem da rajada na taxa de 10 Gbps.	88
TAB.4.16	<i>Jitter</i> introduzido no tráfego de vídeo após a montagem da rajada para a seqüência <i>StarWars</i> ($M/G/\infty$) na taxa de 2.5 Gbps.	89
TAB.4.17	<i>Jitter</i> introduzido no tráfego de vídeo após a montagem da rajada para a seqüência <i>StarWars</i> ($M/G/\infty$), na taxa de 10 Gbps.	89

TAB.4.18	Requisitos de QoS para aplicações de vídeo (ONVURAL, 1995).	89
TAB.4.19	Resumo das restrições de retardo e <i>jitter</i> na determinação de tamanho de <i>buffer</i> para aplicações de áudio e vídeo (ONVURAL, 1995).	90
TAB.7.1	Resumo de elementos de comutador óptico.	104

LISTA DE ABREVIATURAS

ATM	<i>Asynchronous Transfer Mode</i>
<i>dB</i>	Decibel
EDFA	<i>Erbium Doped Fiber Amplifiers</i>
FAC	Função Autocorrelação
FDL	<i>Fiber Delay Line</i>
FDM	<i>Frequency-Division Multiplexing</i>
FRP	<i>Fast-Reservation Protocol</i>
FtB	<i>Frame to Burst</i>
FWC	<i>Fixed Wavelength Converter</i>
FWM	<i>Four-Wave Mixing</i>
GoP	<i>Group of pictures</i>
HOL	<i>Head-Of-Line blocking</i>
IBT	<i>In Band Terminator</i>
IP	<i>Internet Protocol</i>
JET	<i>Just Enough Time</i>
KEOPS	<i>Keys to Optical Packet Switching</i>
LRD	<i>Long Range Dependence</i>
LOBS	<i>Labeled Optical Burst Switching</i>
MPLS	<i>Multiprotcol Label Switch</i>
OBS	<i>Optical Burst Switching</i>
O-E-O	<i>Optical-to-Electrical-to-Optical</i>
OPS	<i>Optical Packet Switching</i>
OTDM	<i>Optical Time-Division Multiplexing</i>
PDL	<i>Polarization-Dependent Loss</i>
PLR	<i>Packet Loss Rate</i>
QoS	<i>Quality of Service</i>
RFD	<i>Reserve a Fix Duration</i>
SDH	<i>Synchronous Digital Hierarchy</i>
SMOP	<i>Shared Memory Optical Switch</i>
SOA	<i>Semiconductor Optical Amplifier</i>
SONET	<i>Synchronous Optical Network</i>
SRD	<i>Short Range Dependence</i>

TAG	<i>Tell and Go</i>
TDM	<i>Time-Division Multiplexing</i>
TWC	<i>Tunable Wavelength Converter</i>
VBR	<i>Variable Bit Rate</i>
WDM	<i>Wavelength Division Multiplexing</i>
WWW	<i>Word Wide Web</i>
XGM	<i>Cross-Gain Modulation</i>
XPM	<i>Cross-Phase Modulation</i>

RESUMO

Esta dissertação apresenta a avaliação do desempenho de redes ópticas comutadas com tecnologia WDM para suporte a tráfego com dependência temporal. A avaliação examina o desempenho de comutadores ópticos de pacotes (OPS) e rajadas (OBS) quando submetidos ao tráfego de vídeo. Este tráfego foi adotado por exibir características de dependência temporal (parâmetro H). As medidas de desempenho determinadas para as arquiteturas OPS e OBS são: a taxa de perda de pacotes (PLR), o retardo (máximo e médio) e a variação do retardo (*jitter*). Além disso, verificamos se o parâmetro H do tráfego de vídeo é alterado pelo processo de comutação óptica. O tráfego de vídeo é modelado pelos processos $M/G/\infty$ e fBm (*fractional Brownian motion*). Esses modelos são validados verificando-se sua capacidade de representação do grau de dependência temporal, FAC (função auto-correlação) e distribuição de chegadas das seqüências de vídeo. Diferentes seqüências de vídeo foram consideradas no estudo.

Este estudo possibilita também o dimensionamento das arquiteturas de comutadores ópticos, através de linhas de retardo óptico (FDLs) e/ou conversores de comprimento de onda para o comutador OPS, ou do *buffer* eletrônico, para montagem das rajadas, no comutador OBS. No dimensionamento procura-se obter os melhores resultados de PLR, retardo, *jitter* e complexidade da arquitetura em termos do número de dispositivos utilizados e custo. Além disso, propusemos um esquema denominado FtB (*Frame to Burst*) para montagem das rajadas a partir de quadros de vídeo, no comutador OBS. Um dos principais resultados demonstrou que a distribuição do tráfego, ao contrário do grau de dependência temporal, é a principal causa de impacto no desempenho dos comutadores ópticos. Portanto, sua consideração torna-se fundamental para o desenvolvimento das futuras redes ópticas comutadas.

ABSTRACT

This dissertation presents the performance evaluation of optical switched network with WDM technology to support traffic with scaling characteristics. The evaluation examines the optical packet (OPS) and burst (OBS) switch performance when submitted to the video traffic. This traffic was adopted by showing time dependence characteristics (H parameter). The determined OPS and OBS architectures performance measures are: packet loss rate (PLR), delay (maximum and mean) and the delay variation (*jitter*). Moreover, we verify if the H parameter of the video traffic is changed by the switching process. The $M/G/\infty$ (KRUNZ, 1998) and fBm (*fractional Brownian motion*) (MANDELROT, 1968) process were considered to represent the video input traffic. This models are validated verifying its capacity of representation of the time dependence degree, autocorrelation function and video sequences arrive distribution. Different sequences of video were considered in the study.

This study it also make possible the dimensioning of the optical networks architectures, by the optical delay lines (FDLs) and/or wavelength converters to the packet switch, or by the electronic buffer, for burst assembly, in the burst switch. In the dimensioning it is looked to get the best results of PLR, delay, delay variation (*jitter*) and architecture complexity in terms of number of used components and cost. Moreover, we proposed a FtB (*Frame to Burst*) mechanism for burst assembly from video frames, at the burst switch. One of the main results demonstrated that the distribution of the traffic, in contrast of the time dependence degree, is the main cause of the impact in the optical switch performance. Therefore, its consideration becomes basic for the development of the future optical switched network.

1 INTRODUÇÃO

1.1 MOTIVAÇÃO

As redes ópticas com tecnologia WDM¹, ou simplesmente redes WDM, são consideradas atualmente como os mais promissores meios de comunicações. Suas principais características são altas taxas de transmissão, alta confiabilidade em termos de perda de informação, imunidade a ruídos eletromagnéticos e pequeno volume ocupado quando comparado aos cabos metálicos (AGRAWAL, 1997).

No início dos anos 90, a oferta de ampla largura de banda passante, tornou a rede WDM bastante atraente para o tráfego IP (*Internet Protocol*). Além disso, esperava-se que o tráfego IP alcançasse taxas de 35 Tbps até o final de 2002 (DIXIT, 2001). No entanto, esta demanda de tráfego IP não aconteceu como previsto.

Os sistemas WDM, permitem o transporte de dezenas de comprimentos de onda por fibra, modulados a taxas de 10 Gbps ou mais (DIXIT, 2001). Apesar da multiplexação WDM ter possibilitado uma melhora considerável na utilização da banda disponível no meio óptico, ela ainda é explorada de forma pouco eficiente. A informação a ser transmitida é multiplexada no meio eletrônico e os canais ópticos WDM são usados de forma praticamente estática.

A possibilidade de implementar uma rede óptica totalmente comutada torna as redes WDM extremamente atraentes para suporte a multi-tráfego (dados, voz e vídeo VBR², por exemplo). O desenvolvimento de novos dispositivos ópticos, a custos competitivos, também impulsionou recentes pesquisas com o objetivo de se alcançar uma rede WDM inteiramente comutada no meio óptico. Assim como nas redes eletrônicas ATM (*Asynchronous Transfer Mode*), o suporte multi-tráfego com garantia de diferentes requisitos de qualidade de serviços (QoS) é o principal desafio das pesquisas na área de engenharia de tráfego. Este desafio está concentrado na previsão do comportamento das conexões ou fontes de tráfego. Ou na obtenção de modelos estocásticos mais precisos que representem o comportamento das conexões. Isto permitiria a melhor utilização dos recursos (*buffer* e banda passante) da rede com a QoS requerida.

As redes ópticas comutadas por pacotes (OPS- *Optical Packet Switching*) e por ra-

¹Multiplexação por divisão de comprimento de onda (WDM - *Wavelength Division Multiplexing*).

²Taxa de bit variável (VBR - *Variable Bit Rate*).

radas (OBS- *Optical Burst Switching*), possibilitam o melhor aproveitamento dos recursos da rede através da multiplexação estatística de conexões (BJORNSTAD, 2003) e (ROUSKAS, 2004). A comutação é feita no próprio meio óptico, sem a necessidade de conversões O-E-O³, resultando em uma rede completamente óptica.

Pela fato da comutação totalmente óptica ser uma proposta recente, existem ainda muitos desafios para o desenvolvimento da tecnologia. Esses desafios estão relacionados principalmente aos dispositivos ópticos necessários a implementação de comutadores ópticos de pacotes. Em função disso, diferentes arquiteturas e soluções têm sido propostas, em vários estudos, considerando-se as restrições dos dispositivos ópticos. Os principais estudos envolvendo os comutadores OBS e OPS, que se tem conhecimento até o momento, consideram apenas o tráfego IP (SIRÉN, 2002), (QIAO, 2000) e (DOLZER, 2001) e protocolos de reserva de comprimentos de onda (DÜSER, 2002) e (YOO, 1997), para OBS.

O tráfego de vídeo apresenta ainda diferentes tipos de distribuição de chegadas, taxas de codificação e intrínseco grau de dependência temporal ou parâmetro de Hurst (H^4) devido ao processo de codificação.

Assim, o estudo de redes comutadas completamente ópticas, é uma interessante área de pesquisa. Nesta dissertação fazemos a avaliação de desempenho dos comutadores ópticos de pacotes e rajadas para suporte a tráfego de vídeo com dependência temporal.

1.2 OBJETIVOS

Neste estudo examinamos o desempenho de comutadores ópticos de pacotes (OPS) e rajadas (OBS) avaliando-se a taxa de perda de pacotes (PLR- *Packet Loss Rate*), o retardo e a variação do retardo (*jitter*), quando alimentados pelo tráfego de vídeo com dependência temporal. Também é verificado se o parâmetro H do tráfego de vídeo foi alterado no processo de comutação.

O estudo possibilita que se dimensione arquiteturas de comutadores ópticos, através de montagem de rajadas (OBS) e *buffer* ou linhas de retardo óptico⁵ e/ou TWCs⁶ (OPS). Este dimensionamento visa obter os melhores resultados em termos de PLR, *jitter*, complexidade e retardo.

Em nosso estudo, o tráfego de vídeo é representado pelos modelos de tráfego $M/G/\infty$ (KRUNZ, 1998) e fBm (*fractional Brownian motion*) (MANDELBROT, 1968). Esses mo-

³Conversão óptica-elétrica-óptica (O-E-O-*Optical-to-Electrical-to-Optical*).

⁴O parâmetro H será definido na Seção 3.2 e é característico de cada seqüência.

⁵FDLs - *Fiber Delay Lines*

⁶Conversor de comprimento de onda ajustável (TWC - *Tunable Wavelength Converter*).

delos são utilizados por capturarem adequadamente as estatísticas de primeira e segunda ordens do tráfego de vídeo real. Os modelos são apresentados e avaliados, comparando os resultados de representação da função auto-correlação e distribuição de cauda pesada com os obtidos com trechos (*traces*) de seqüências de vídeos reais.

1.3 PRINCIPAIS RESULTADOS OBTIDOS

- Dimensionamento do *buffer* óptico no comutador OPS, através do número de FDLs e TWCs necessários para multiplexar fontes de vídeo considerando uma dada PLR.
- Dimensionamento de *buffer* ou tamanho da rajada para o comutador OBS para tráfego de vídeo, diante de requisitos de QoS.
- Impacto do *buffer* dos comutadores ópticos (OPS e OBS) no grau de dependência temporal do tráfego de vídeo.
- Número de FDLs necessárias no comutador OPS, para se obter um desempenho, em termos de PLR, similar ao do comutador OBS.
- Validação dos modelos $M/G/\infty$ e fBm para representação do tráfego de vídeo.

1.4 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

O restante desta dissertação está organizada da seguinte forma:

Capítulo 2: Neste capítulo descrevemos conceitos e arquiteturas de comutação óptica de comprimento de onda, de pacotes e rajadas. As principais soluções propostas para contornar o problema da implementação de *buffer* no meio óptico são apresentadas, em diversas arquiteturas de comutadores ópticos de pacotes.

Os requisitos de QoS de algumas aplicações são expostos, assim como parâmetros de desempenho que foram utilizados em nossa análise. Também fazemos um resumo dos principais requisitos necessários aos dispositivos ópticos, para utilização em comutadores ópticos.

Também veremos como a comutação óptica de pacotes melhora a utilização da banda passante no meio óptico enquanto que na comutação de comprimentos de onda há grande desperdício de banda. Entretanto, a implementação de comutadores ópticos de pacotes ainda é difícil e cara, devido a problemas existentes com

os dispositivos ópticos. A comutação de rajadas pode ser uma alternativa, a curto prazo, para contornar esses problemas, mas no entanto, algumas aplicações possuem restrições quanto a parâmetros de QoS que talvez não sejam atendidas pela comutação óptica de rajadas.

Capítulo 3: O objetivo deste capítulo é explicar os modelos analíticos e de simulação considerados na avaliação de desempenho dos comutadores ópticos de pacotes (OPS) e rajadas (OBS), quando submetidos ao tráfego de vídeo com dependência temporal. Neste capítulo também apresentamos os modelos de tráfego $M/G/\infty$ (KRUNZ, 1998) e fBm (MANDELROT, 1968) usados para representar o tráfego de vídeo com dependência temporal.

Capítulo 4: Neste capítulo expomos os principais resultados de avaliação de desempenho de comutadores ópticos de pacotes e de rajadas, considerando tráfego de vídeo com dependência temporal. Esse resultado, obtido com as duas arquiteturas, OPS e OBS, é expresso em termos de *jitter*, retardo, PLR e número de fontes multiplexadas. Também verificamos se o parâmetro H das seqüências de vídeo foi afetado pelos comutadores ópticos.

Nos resultados também fazemos o dimensionamento do número de FDLs e TWCs necessários para multiplexar um determinado número de fontes de vídeo. Assim como o resultado do dimensionamento do *buffer* utilizado na comutador OBS.

Com os resultados também verificamos quantas FDLs são necessárias no comutador OPS, para se obter um desempenho em termos de PLR similar ao do comutador OBS.

Os modelos de tráfego de vídeo são validados comparando o parâmetro H , a função autocorrelação (FAC) e distribuição em cauda pesada dos modelos e de trechos de seqüências reais.

Capítulo 5: Nesse capítulo concluímos o trabalho e apresentamos sugestões para trabalhos futuros.

2 COMUTAÇÃO ÓPTICA

2.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo descrevemos conceitos da comutação óptica de comprimento de onda, de pacotes e rajadas. O principal desafio para implementação da comutação totalmente óptica se refere a indisponibilidade de componentes ou dispositivos ópticos, como por exemplo a memória RAM óptica, para a formação do armazenamento óptico.

Através das funções de comutação e multiplexação de sinais, é possível reduzir o número de enlaces necessários para se interligar vários terminais de comunicação. Assim como nas redes comutadas eletrônicas, os principais tipos de comutação óptica são: a) de circuitos (comprimento de onda ou luz - *lightpath*), b) de pacotes, e c) de rajadas. As principais características de cada um dos tipos de comutação no meio óptico também são apresentadas neste capítulo.

Na comutação de comprimento de onda há desperdício de banda passante do canal óptico, quando o tráfego não é constante. A comutação óptica de pacotes melhora a utilização da banda passante e esta é sua principal vantagem. A comutação de rajadas foi proposta como alternativa entre a comutação de pacotes e de comprimento de onda. Mas, algumas aplicações possuem restrições quanto a parâmetros de QoS, que talvez não sejam atendidas pela comutação óptica de rajadas.

As principais soluções propostas para contornar o problema da implementação de *buffer* no meio óptico são apresentadas, em diversas arquiteturas de comutadores ópticos de pacotes. Essas soluções utilizam FDLs e conversores de comprimento de onda. Os requisitos de QoS e parâmetros de desempenho são vistos na Seção 2.6 e na Seção 2.7 fazemos um resumo dos principais assuntos do capítulo.

2.2 CONCEITOS E DEFINIÇÕES DE FIBRAS ÓPTICAS

As comunicações ópticas utilizam a luz na faixa de frequência do infravermelho de 10^{14} a $10^{15} Hz$. A fibra óptica é um guia de onda cilíndrico, formado por núcleo e casca, onde a luz se propaga através de reflexões⁷ internas. A velocidade de propagação da luz na fibra óptica é cerca de 2/3 da velocidade da luz no vácuo (AGRAWAL, 1997), acarretando

⁷Para simplificar admitimos reflexão interna total.

um retardo de $5\mu s$ por km percorrido. Um sinal ao se propagar pela fibra óptica será atenuado, perdendo potência. A atenuação ocorre por fatores intrínsecos e extrínsecos ao material e varia em função do comprimento de onda. A distância máxima do enlace óptico é limitada pela atenuação, uma vez que o sinal deve ter um valor mínimo para ser recuperado pelo receptor. A FIG.2.1 mostra a curva de perda por km na fibra em função do comprimento de onda. Observa-se, que em algumas faixas de frequência, denominadas janelas, a atenuação na fibra é menor. Estas, são portanto as faixas adotadas para as comunicações ópticas. As janelas estão situadas em comprimentos de onda próximos a $0.85\mu m$, $1.3\mu m$ e $1.5\mu m$. Nas fibras ópticas monomodo⁸ disponíveis comercialmente hoje, a atenuação está em torno de $0.2dB^9/km$.

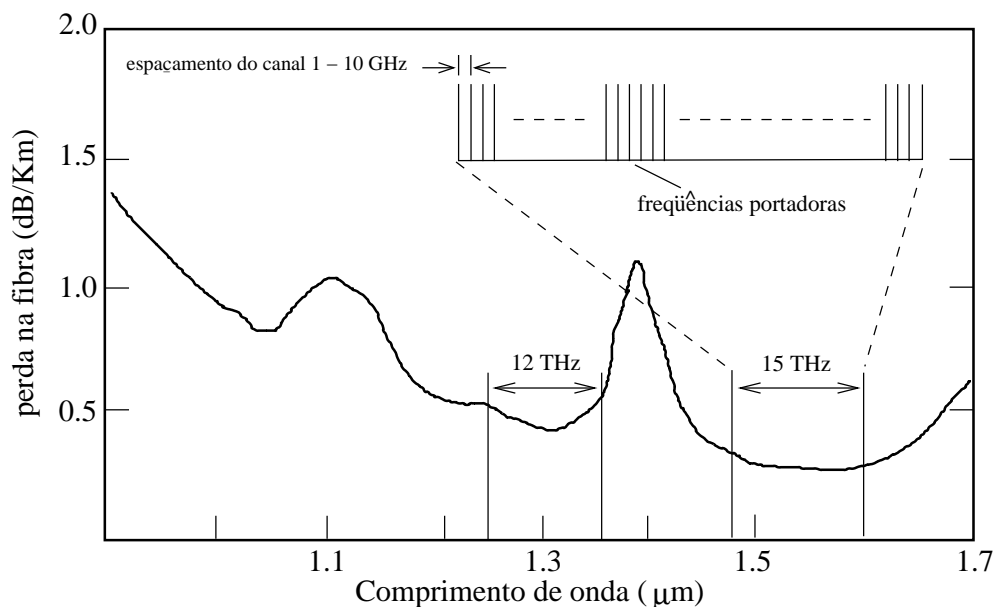


FIG. 2.1: Gráfico de Atenuação na fibra óptica (AGRAWAL, 1997).

Através da função de multiplexação pode-se melhorar a capacidade de utilização de um meio físico de comunicação, transmitindo muitos canais simultaneamente. Na multiplexação por divisão no tempo (*TDM-time-division multiplexing*), diferentes canais são intercalados no tempo. Cada canal utiliza a banda disponível no meio físico por uma fração do tempo, em um esquema circular.

⁸Na fibra monomodo a atenuação do sinal é menor que na multimodo. Além disso, na fibra multimodo existe a dispersão intermodal. Esta fibra tem diâmetro do núcleo maior que a monomodo, fazendo com que os raios (ou modos) que formam o feixe de luz percorram caminhos diferentes, chegando ao destino dispersos no tempo.

⁹Geralmente a razão R entre potências é convertida para decibel (dB) através da relação $R(dB) = 10\log_{10}R$. A natureza logarítmica do dB permite que um grande valor de razão seja expresso por um número pequeno(AGRAWAL, 1997).

Na multiplexação por divisão de frequência (*FDM-frequency-division multiplexing*) os canais são separados no domínio da frequência. Cada canal é associado a uma frequência distinta, espaçada das demais por uma faixa de frequência maior que a largura de faixa do canal. Esse espaçamento entre canais é necessário para evitar a sobreposição dos canais.

Para o meio óptico a multiplexação FDM é denominada WDM (*Wavelength Division Multiplexing*), tomando como referência o comprimento de onda (AGRAWAL, 1997). A cada canal é atribuído um comprimento de onda onde distintos comprimentos de onda podem compartilhar uma fibra óptica simultaneamente. Muitos canais WDM podem ser multiplexados em uma mesma fibra pois a largura de banda das janelas na fibra óptica é grande¹⁰. Se, por hipótese, definíssemos um espaçamento entre canais da ordem de 50 GHz¹¹, teríamos centenas de canais de 10 Gbps por janela (AGRAWAL, 1997). Segundo Dixit e Ye (DIXIT, 2001), já existem sistemas comercialmente disponíveis que operam com 40 canais, cada um na faixa de 10 Gbps. Um obstáculo quando se quer trabalhar com menores espaçamentos entre canais WDM é que além de atenuado, o sinal óptico ao se propagar pela fibra pode ser distorcido, devido a dispersão¹². Isso dificulta a detecção do sinal na demultiplexação dos canais. A utilização de dispositivos ópticos melhores, como fontes de luz com estreita largura espectral e fotodetectores com alta sensibilidade, contribuem para reduzir os efeitos da dispersão (AGRAWAL, 1997).

Dependendo da técnica de comutação óptica utilizada, serão necessários dispositivos ópticos capazes de operar a 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 trazem muitas restrições à implementação de redes ópticas comutadas (RAMASWAMI, 2002). 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. Os principais parâmetros de avaliação de desempenho em termos de degradação do sinal óptico em comutadores ópticos são:

Perda de inserção (*insertion loss*) . É a fração da potência do sinal óptico que é perdida no comutador. Essa perda deve ser minimizada e deve ocorrer de forma

¹⁰As janelas possuem largura de banda da ordem de *THz*.

¹¹Valor típico usado na indústria (CISCO, 2000).

¹²Apesar da dispersão nas fibras monomodo ser muito menor que nas fibras multimodo, ela ocorre devido a variação da velocidade de propagação dos componentes espectrais do sinal, variação do índice de refração da fibra com o comprimento de onda e de outros parâmetros da fibra (AGRAWAL, 1997).

uniforme entre as conexões de todas entradas e saídas.

Diafonia (*crosstalk*) . No meio óptico, a diafonia em uma dada saída do comutador é a relação entre a potência da entrada desejada e a potência de todas as outras entradas do comutador.

Taxa de extinção (*extinction ratio*) . A taxa de extinção em uma porta, que funciona como chave liga-desliga no meio óptico, é a relação entre as potências na saída da porta nos estados ligado e desligado (*on-off*).

Perda dependente de polarização (PDL - *Polarization Dependent Loss*) .

Quando a perda de potência no comutador não é igual para ambos estados de polarização do sinal óptico, a perda é dependente de polarização. Os comutadores devem ter baixa PDL.

2.3 COMUTAÇÃO DE COMPRIMENTO DE ONDA

Conforme mencionado anteriormente, a comutação deve permitir o compartilhamento do canal de comunicação entre vários nós ou pares origem/destino. Dependendo de fatores tais como a característica do tráfego, da aplicação e de requisitos de QoS, emprega-se o tipo de comutação que melhor utilize os recursos da rede. Além disso, a rede deverá garantir diferentes requisitos de QoS dos tráfegos.

Na comutação de comprimento de onda¹³ ou de luz, a alocação dos comprimentos de onda é permanente ou dedicada, entre os nós da rede. Dessa forma é estabelecido um caminho de luz (*lightpath*) entre origem e destino durante todo o tempo de conexão. Este tipo de comutação é o equivalente a comutação de circuitos nas redes eletrônicas. Após o procedimento de solicitação do canal, o caminho de luz fica dedicado à comunicação pelo período exigido, ou seção, independente da utilização do enlace. O canal é liberado após o término da comunicação. Isto ocasionará desperdício de recursos da rede. Do ponto de vista de utilização, a comutação de comprimento de onda torna-se interessante quando o tráfego é constante, e em volume tal que preencha o canal durante todo tempo da conexão. Caso contrário, haverá grande desperdício da banda passante. Como o comprimento de onda é dedicado, a conexão é transparente a taxa de bit e ao formato da codificação da informação empregada. A comutação de comprimento de onda é adequada para suporte

¹³A comutação de comprimento de onda também é denominada roteamento de comprimento de onda (*wavelength routing*).

de redes de infra-estrutura óptica, como por exemplo a SONET/SDH¹⁴, onde a duração da seção é maior que o tempo de estabelecimento da conexão. Além disso, pode-se reduzir o número de roteadores SONET/SDH, através do agregamento de tráfego e da utilização de algoritmos de atribuição de comprimentos de onda (QIAO, 2000).

Na comutação de comprimento de onda, tolera-se um tempo relativamente elevado para o estabelecimento do circuito, da ordem de *ms*. Esse tempo é muito menor que a duração da seção e compatível com componentes¹⁵ opto-micromecânicos, opto-acústicos e termo-ópticos (QIAO, 2000), (PAPADIMITRIOU, 2003) disponíveis comercialmente. No entanto, este tipo de comutação torna-se inviável caso a aplicação tenha restrição na duração do estabelecimento da conexão. Além disso, quando o tráfego é variável (VBR), que é o caso do tráfego de vídeo, a necessidade por banda passante é dinâmica, logo uma comutação por comprimento de onda é totalmente inapropriada. Nesse caso, outros tipos de comutação são mais adequados, pois permitem o compartilhamento do canal de forma mais eficiente, aumentando a utilização dos recursos da rede. Além da baixa utilização do canal quando o tráfego é variável, apenas um limitado número de caminhos podem ser estabelecidos, devido ao restrito número de comprimentos de onda disponíveis (QIAO, 1999). Na seção seguinte será apresentada a comutação óptica de pacotes, onde o canal não fica dedicado a um par origem-destino durante a seção. A comutação óptica de pacotes possibilita otimizar a utilização dos recursos disponíveis da rede óptica.

2.4 COMUTAÇÃO ÓPTICA DE PACOTES

Na comutação de pacotes os bits de informação são montados em pequenos blocos, denominados pacotes. Geralmente, o formato do pacote possui dois campos distintos: cabeçalho e informação. As principais vantagens da comutação de pacotes são: 1) melhorar a utilização dos recursos da rede (banda passante); 2) mais fontes podem compartilhar o mesmo meio físico; 3) flexibilidade na taxa de transmissão e 4) tamanho do pacote pode se adequar ao tamanho da mensagem, quando se utiliza pacotes de tamanho variável.

As mesmas vantagens são definidas para a comutação óptica de pacotes, logo, através do compartilhamento estatístico do meio óptico, muitas fontes de tráfego podem ser multiplexadas em um mesmo meio óptico. Além disso, aumenta-se também a flexibilidade

¹⁴SONET (*synchronous optical network*) - rede óptica síncrona. SDH (*synchronous digital hierarchy*) - Hierarquia digital síncrona.

¹⁵Os componentes ópticos usados na comutação WDM serão abordados no APÊNDICE 2.

no gerenciamento da banda disponível na rede WDM (HUNTER, 2000).

As redes ópticas com comutação de pacotes podem ser classificadas em síncrona (*slotted*) e assíncrona (*unslotted*) (RAMASWAMI, 2002) e (PAPADIMITRIOU, 2003). Os pacotes¹⁶ podem ser de tamanho fixo ou variável. Na comutação síncrona, os pacotes devem ter tamanho fixo e ao entrarem no comutador óptico de pacotes precisam ser alinhados, em fase com um relógio local. O sincronismo¹⁷ no meio óptico é complicado, uma vez que ainda não se consegue processamento de sinal no nível de bits (DANIELSEN, 1998). Na comutação assíncrona, os pacotes não necessariamente têm o mesmo tamanho (PAPADIMITRIOU, 2003). Ao entrarem no comutador não precisam ser alinhados e a comutação pode ser feita em qualquer instante. Na comutação assíncrona há um aumento na perda de pacotes (DANIELSEN, 1998), mas evita-se o complicado alinhamento, o custo do comutador diminui, além de ser mais flexível.

Os enlaces da rede, compostos de caminhos de luz (*lightpaths*), são interligados pelos comutadores ópticos de pacotes, que direcionam os pacotes conforme o destino. O cabeçalho de cada pacote deve conter dados de controle tais como destino, origem, tamanho do campo de dados (no caso de pacote com tamanho variável) e identificação do pacote. Esses dados de controle são necessários ao encaminhamento do pacote pelos diferentes comutadores da rede e para a recuperação da informação no destino.

O cabeçalho do pacote pode ser transmitido separado da área de informação. Na maioria das propostas de formato de pacote óptico (RAMASWAMI, 2002), o cabeçalho é codificado a taxas menores que o campo de informação. Geralmente, o cabeçalho é codificado em uma taxa de 622 Mbps¹⁸, compatível com a taxa utilizada no meio eletrônico. O cabeçalho do pacote pode ser transmitido em outro comprimento de onda (XU, 2001). Como ainda não se consegue processamento binário no meio óptico, o cabeçalho do pacote ao chegar ao comutador óptico, é lido na interface de entrada e convertido para o meio eletrônico. No meio eletrônico, o cabeçalho é processado, e posteriormente, re-inserido no meio óptico. O campo de informação do pacote não é alterado pelo comutador, permanecendo todo o tempo no meio óptico, obtendo assim, total transparência.

A FIG.2.2 mostra um exemplo de formato do pacote que poderá ser usado em redes com comutação óptica de pacotes. Esse formato de pacote também foi utilizado no

¹⁶O tamanho do pacote óptico ainda encontra-se em discussão e não existe padronização até o momento.

¹⁷Em (RAMASWAMI, 2002) é apresentado um processo de sincronismo usando retardo variável através de um conjunto de FDLs.

¹⁸Esta taxa de referência é originada na rede ATM.

projeto KEOPS (*Keys to Optical Packet Switching*) (CHIARONI, 1998). Para evitar a sobreposição de bits na detecção, entre o cabeçalho e os campos de um determinado pacote e o pacote seguinte, é definido um tempo de guarda. Neste exemplo, a duração do pacote de $1.646\mu s$ foi obtida considerando-se o tempo necessário para a transmissão de 128 bits a uma taxa de 622 Mbps. Nessa taxa, o cabeçalho de $180ns$ pode transportar 14 bytes. A rede especifica a duração em tempo do pacote, mas não a taxa em que é codificada o campo de informação (GAMBINI, 1998). No campo de informação de $1.35\mu s$, podem ser transportados de 105 bytes (taxa de 622 Mbps) a 1680 bytes (taxa de 10 Gbps).

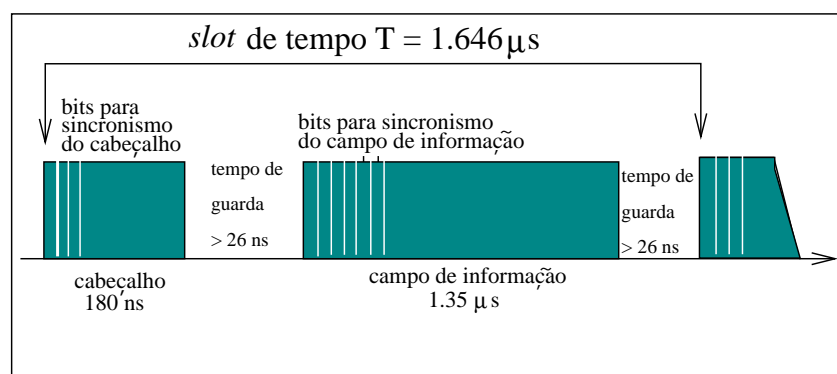


FIG. 2.2: Exemplo de formato do pacote (CHIARONI, 1998).

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 serão bloqueados ou perdidos. Este fenômeno é denominado de contenção por congestionamento e é o principal desafio das redes comutadas por pacotes (eletrônicos ou ópticos). A solução que geralmente se adota para resolver o problema de contenção nos comutadores eletrônicos¹⁹, é armazenar os pacotes em um *buffer* (feito de memória RAM) até que a porta de saída esteja livre. Este é um dos principais problemas no desenvolvimento de comutadores ópticos de pacotes, pois ainda não há tecnologia disponível para se implementar memórias RAM ópticas²⁰. Como a utilização de memórias eletrônicas dentro da rede óptica implica em conversão O-E-O, que introduziria um grande retardo, algumas

¹⁹Além de resolver o problema da contenção, os *buffers* são utilizados nos comutadores eletrônicos em um esquema *store-and-forward* (armazena e envia). O pacote é armazenado no *buffer* pelo menos por um intervalo mínimo necessário para o comutador ler o conteúdo do cabeçalho do pacote e comutá-lo conforme o destino.

²⁰Alguns resultados experimentais já foram obtidos (AGARWAL, 2001) e (KU, 2002) mas o desenvolvimento de memórias RAM ópticas ainda é objeto de pesquisa em laboratórios.

soluções foram propostas para resolver o problema de contenção. Neste trabalho estudamos arquiteturas de comutadores ópticos onde a contenção é solucionada utilizando-se *buffers* ópticos e conversores de comprimento de onda.

2.4.1 CONTENÇÃO EM COMUTAÇÃO ÓPTICA DE PACOTES

O problema da contenção na comutação óptica de pacotes pode ser resolvido de várias maneiras. Uma opção é converter o pacote para um comprimento de onda que esteja disponível, usando conversores de comprimento de onda²¹. Uma segunda alternativa é retardar o pacote, até que a porta de saída esteja livre, através de FDLs, que implementam a função de *buffers* ópticos. As duas soluções anteriores também podem, e devem, ser utilizadas em conjunto.

Uma outra opção utilizada para resolver contenção em redes ópticas comutadas, é direcionar o pacote para um caminho alternativo (*deflection routing*) que esteja livre. Essa alternativa pode aumentar o percurso do pacote. Isto introduz um significativo aumento no retardo total sofrido pelo pacote, havendo ainda o risco dos pacotes chegarem ao destino fora de ordem. Essa solução não se aplica em nosso contexto, pois visa resolver o congestionamento da rede como um todo, conforme seu comportamento. O problema de contenção aqui abordado se refere ao ambiente do comutador óptico e não da rede.

No exemplo, ilustrado na FIG. 2.3, os pacotes oriundos das entradas E1 e E2 têm como destino a mesma porta de saída, no mesmo instante t_1 . O pacote de E2 sofrerá um retardo adicional introduzido pela FDL, com atendimento iniciado em t_2 e concluído em $t_3 = t_2 + 2\Delta t$. Enquanto o pacote de E1 tem atendimento iniciado em t_1 e é finalizado em $t_2 = t_1 + \Delta t$. Nesse exemplo, desconsideramos o tempo necessário para identificar o cabeçalho.

Converter o pacote para outro comprimento de onda minimiza a necessidade de *buffer* óptico podendo até mesmo eliminar essa necessidade. No entanto, a desvantagem desta solução está no limitado número de comprimentos de onda disponíveis, e no elevado custo dos conversores de comprimento de onda. Uma interessante solução seria 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 (DANIELSEN, 1998), obtendo-se uma arquitetura óptica mais simples, com baixo custo e desempenho melhor.

A FIG. 2.4 ilustra duas implementações de um *buffer* óptico. Uma implementação

²¹Os conversores de comprimento de onda podem ser do tipo fixo (FWC - *fixed wavelength converter*) ou variável (TWC).

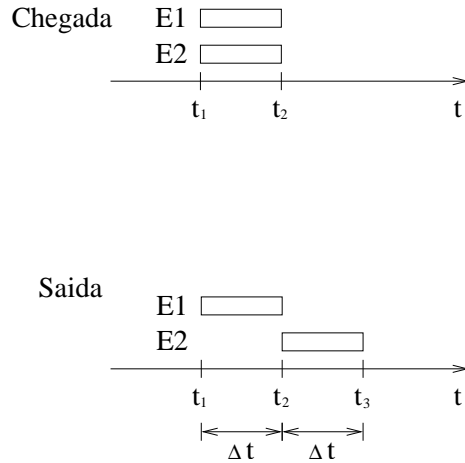


FIG. 2.3: Exemplo de retardo aplicado aos pacotes pela FDL.

utilizando apenas FDLs, e outra FDL e conversor de comprimento de onda. Neste exemplo, que estão representadas as funções de comutação e multiplexação, sem o conversor de comprimento de onda são necessárias duas FDLs, enquanto que com o uso de um conversor, uma FDL é suficiente para resolver a contenção. Nesse caso, dois pacotes podem compartilhar a mesma FDL, em distintos comprimentos de onda. No exemplo, desconsideramos o tempo necessário para a conversão do comprimento de onda.

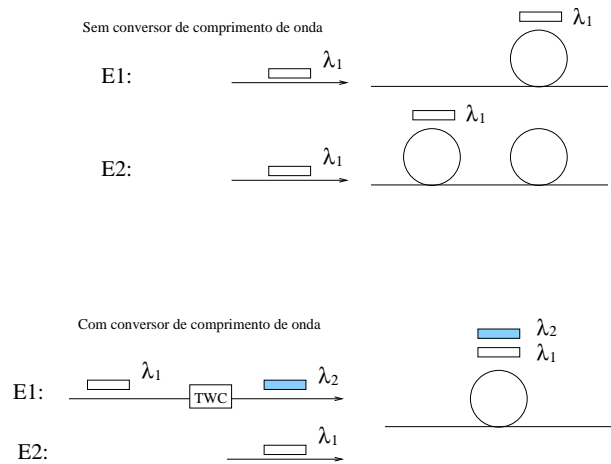


FIG. 2.4: Implementação de *buffer* óptico utilizando FDLs com e sem TWC.

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.

De uma maneira geral, o *buffer* pode ser implementado na entrada do comutador, na saída ou em ambos (RAMASWAMI, 2002) (HLUCHYJ, 1988). 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 outro pacote que não esteja na cabeça da fila, entretanto é uma solução complicada no meio óptico e de implementação inviável. Além disso, não há como determinar o retardo que é necessário se aplicar ao pacote antes que ele entre no *buffer*, pois irá depender das demais entradas do comutador. Isso significa que talvez não seja possível comutar um pacote que esteja saindo da FDL para a saída desejada, se esta estiver ocupada (RAMASWAMI, 2002). Nesse caso, o pacote será descartado, resultando em um baixo desempenho do comutador. Assim, as propostas de arquiteturas de comutadores ópticos de pacotes utilizam *buffer* na saída do comutador.

Os *buffers* ópticos implementados na saída do comutador podem ser construídos utilizando-se FDLs de duas diferentes formas. Essas implementações podem ser classificadas em *feedback* e *feed-forward*.

- *Feedback* - Nessa implementação, 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 (vide FIG. 2.5).

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 portas²² ópticas (RAMASWAMI, 2002), que limita o número máximo de re-circulações. Além disso, a degradação do sinal óptico não será homogênea, pois dependerá do número de re-circulações de cada pacote (RAMASWAMI, 2002). Nessa arquitetura a FDL retarda o pacote por um tempo igual a duração do pacote a cada re-circulação.

Como a FDL de re-circulação pode ser compartilhada, é necessário utilizar portas de acesso adicionais na saída do comutador. Ou seja, um comutador com uma matriz de comutação mais densa. Algumas arquiteturas de comutadores ópticos de pacotes foram propostas implementando *buffer* de re-circulação. A arquitetura SMOP (*shared memory optical switch*)(KAROL, 1993) utiliza várias FDLs, de comprimentos múltiplos da duração do pacote, na re-circulação. Com FDLs

²²Os portas ópticas são elementos que funcionam como chave liga-desliga. No APÊNDICE 2 apresentamos os principais componentes usados na implementação de comutadores ópticos.

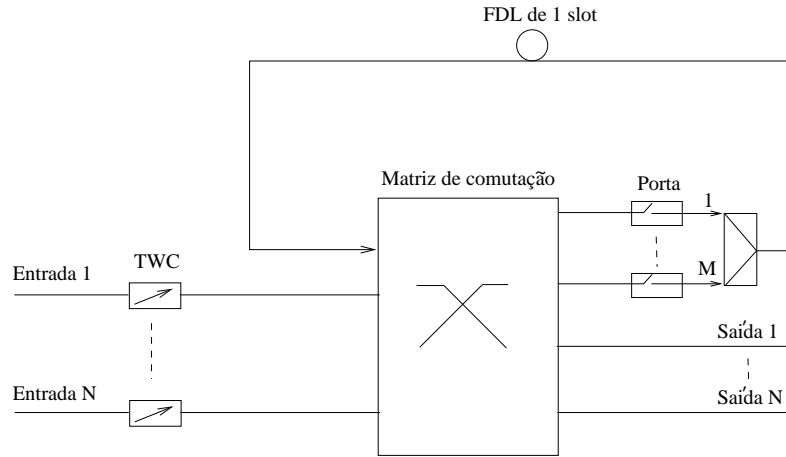


FIG. 2.5: Arquitetura genérica de comutador óptico de pacotes com *buffer* de re-circulação.

de tamanhos maiores, é possível reduzir o número de re-circulações do pacote. Na arquitetura de múltiplos comprimentos de onda (BENDELLI, 1996), múltiplos pacotes podem ser armazenados na mesma FDL de re-circulação, em diferentes comprimentos de onda. Para tal ele introduz conversores de comprimento de onda, antes da FDL.

- *Feed-forward* - A FIG. 2.6 ilustra uma arquitetura genérica de um comutador óptico de pacotes com implementação de *buffer feed-forward*. São $K + 1$ FDLs²³ associadas a cada porta de saída. 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.

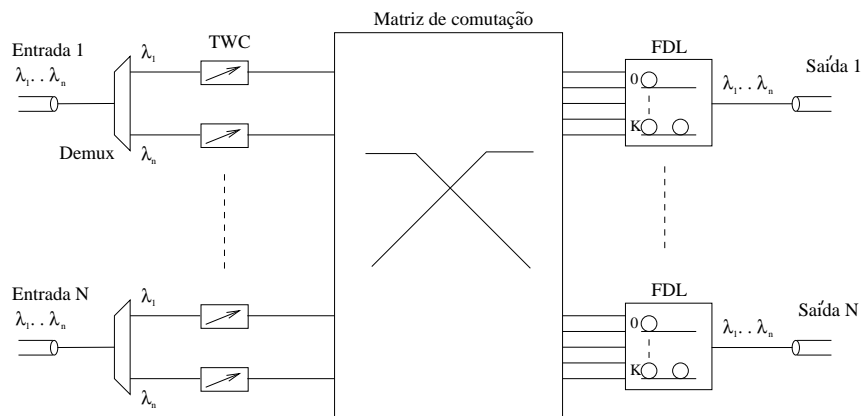


FIG. 2.6: Arquitetura genérica de comutador óptico de pacotes *feed-forward*.

²³A FDL K_0 tem comprimento infinitesimal e não retarda o pacote.

Na implementação *feed-forward*, o pacote passa por uma FDL, entre várias FDLs que estão entre a entrada e a saída do comutador óptico. A matriz de comutação direciona o pacote para 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 (RAMASWAMI, 2002).

Algumas arquiteturas de comutadores ópticos de pacotes foram propostas com implementação de *buffer feed-forward*. O OASIS (GABRIAGUES, 1995) simula um comutador com *buffer* na saída. Cada pacote sofre um retardo entre 0 e um determinado número máximo de intervalos de tempo, antes de ser direcionado para a porta de saída destino.

Na arquitetura *broadcast-and-select*, implementada no KEOPS (GUILLEMOT, 1998) e (XU, 2001), os pacotes em cada entrada são convertidos para distintos comprimentos de onda, através de conversores de comprimento de onda fixos. Todos os pacotes são multiplicados e inseridos em todas as FDLs por uma difusão (*broadcast*). Através de portas, seleciona-se o pacote desejado, conforme a saída destino.

Com o intuito de otimizar a utilização das FDLs, outras arquiteturas *feed-forward* foram propostas, onde um banco de FDLs é compartilhado entre as saídas do comutador. O custo de fazer o compartilhamento das FDLs é o aumento na complexidade da matriz de comutação e/ou necessitar de um maior número de conversores de comprimentos de onda (DANIELSEN, 1997). A FIG. 2.7 ilustra a arquitetura genérica de um comutador óptico de pacotes *feed-forward* com *buffer* compartilhado na saída. Nesse caso, a matriz de comutação deve ter $N \times n$ entradas por $(K + 1)$ saídas, e são necessários $n \times N$ distintos comprimentos de onda internamente, além de conversores de comprimentos de onda adicionais na saída (DANIELSEN, 1997).

O principal desafio no dimensionamento de comutadores ópticos de pacotes é, portanto, determinar o número de FDLs a serem utilizadas em um comutador óptico de pacotes, assim como o tamanho das FDLs e o número de conversores de comprimentos de onda.

O dimensionamento deve considerar a duração do pacote, o tipo de tráfego e garan-

tir requisitos de QoS tais como a PLR, *jitter*²⁴ e retardo. Além disso, espera-se um elevado grau de multiplexação de pacotes/fontes de tráfego que permita a exploração das principais vantagens do OPS.

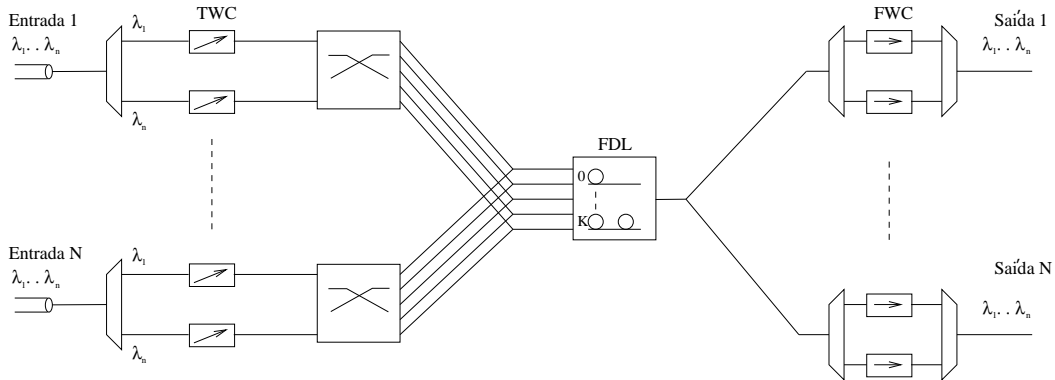


FIG. 2.7: Arquitetura genérica de comutador óptico de pacotes com *buffer feed-forward* compartilhado.

Quaisquer das implementações de *buffers* ópticos que utilize FDLs na resolução de contenção, traz uma série de inconvenientes. Uma vez que um pacote tenha entrado em uma FDL, só estará disponível ao percorrer toda a FDL. Ou seja, não há acesso aleatório ao pacote (RAMASWAMI, 2002). O pacote não pode ficar armazenado na FDL por um tempo indefinido. Cada pacote experimentará uma variação de retardo diferente. As FDLs são caras e volumosas (PAPADIMITRIOU, 2003), ocupando muito espaço nos comutadores ópticos.

2.4.2 ARQUITETURA DE COMUTADORES ÓPTICOS DE PACOTES

Conforme mencionado anteriormente, o grande obstáculo para a implementação de comutadores ópticos WDM está nos componentes ópticos atualmente disponíveis, face a limitações tecnológicas. A limitação não se restringe ao *buffer* óptico implementado através de FDLs, mas também no que se refere as matrizes de comutação, para compor o comutador e aos TWCs. Os componentes disponíveis são, de uma maneira geral, muito caros. Além disso, são lentos na comutação, quando comparados à velocidade da rede óptica, e em muitos casos poderão causar grandes distorções ao sinal óptico, limitando o número de componentes que podem ser colocados em cascata.

1. Arquitetura genérica de comutador óptico de pacotes com compartilhamento de conversor de comprimento de onda

²⁴ *Jitter* é a variação do retardo.

Na arquitetura de comutador óptico de pacotes da FIG.2.6 os TWCs são aplicados para endereçar os pacotes conforme a saída destino e também para otimizar a utilização das FDLs no *buffer* óptico.

No entanto, os TWCs podem não estar sendo requisitados o tempo inteiro, porque alguns pacotes podem chegar ao comutador óptico já no comprimento de onda adequado para ser comutado. Ou as FDLs são em número suficiente para armazenar o volume de tráfego em um determinado momento. Somando-se ao fato de que os TWCs são componentes caros, pode-se implementar uma arquitetura onde estes são compartilhados, conforme a FIG.2.8 (ERAMO, 2000).

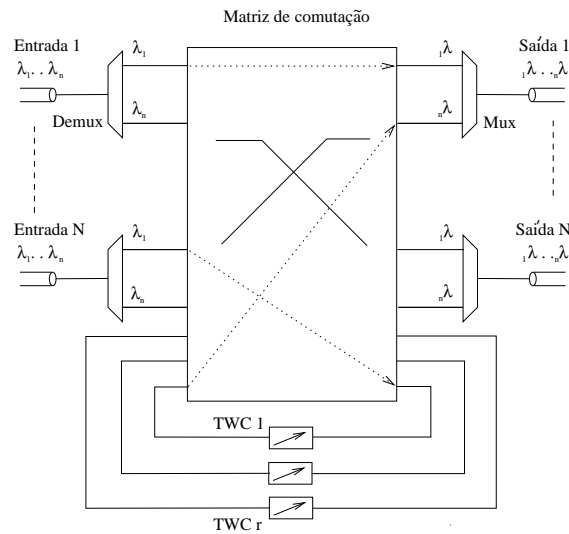


FIG. 2.8: Arquitetura genérica de comutador óptico de pacotes com conversor de comprimento de onda compartilhado.

Os pacotes que chegam ao comutador oriundos de diversas fontes em distintos comprimentos de onda, são demultiplexados. A unidade de controle do comutador óptico lê o conteúdo do cabeçalho dos pacotes e aciona as portas na matriz de comutação. Os pacotes que não necessitam de conversão são direcionados para a porta de saída. Os que precisam ser convertidos são encaminhados para um dos r TWCs e após serem convertidos são direcionados para a porta de saída.

O compartilhamento possibilita a redução do número de TWCs necessários quando comparado a outras arquiteturas com o mesmo número de canais de entrada. O problema desta arquitetura é o aumento do tamanho da matriz de comutação pelas portas adicionais necessárias. A atenuação do sinal óptico também é aumentada, pois os pacotes que passam pelos TWCs atravessam a matriz de comutação duas

vezes, também desbalanceando o sinal óptico.

Na prática os TWC têm uma faixa limitada de capacidade de conversão de comprimento de onda. Além disso, trabalhar com uma faixa muito ampla poderia implicar em diminuir a velocidade de comutação (PAPADIMITRIOU, 2003). Uma arquitetura com *buffers* ópticos nas saídas implementado com FDLs pode armazenar n pacotes simultaneamente, em diferentes comprimentos de onda. No entanto, com a capacidade de conversão limitada, embora haja espaço nas FDLs, alguns pacotes não conseguirão ser armazenados usando o comprimento de onda livre. A capacidade de conversão de comprimento de onda é expressa em *grau de conversão de comprimento de onda d* . Quando $d = n$ o conversor tem capacidade total, ou seja, abrange a faixa completa.

No APÊNDICE 1 apresentamos outras arquiteturas de comutadores ópticos de pacotes.

2.5 COMUTAÇÃO ÓPTICA DE RAJADAS

A comutação OBS foi pensada como solução intermediária entre a comutação de circuitos e pacotes. A comutação de rajadas foi estudada para redes ATM (EBS - *electronic burst switching*) conhecida como comutação rápida (*fast switching*). Boyer propôs em (BOYER, 1992) um protocolo para reserva de recursos denominado FRP - *fast-reservation protocol* ou protocolo de reserva rápida.

Na comutação óptica de rajadas (OBS) os bits ou pacotes são agregados na borda da rede, formando uma rajada, que é transmitida através de um caminho de luz, alocado por um período suficiente para a transmissão da rajada. Como o comprimento de onda, que estabelece o caminho de luz, fica alocado somente durante a transmissão da rajada, evita-se o desperdício de banda que existe na comutação de comprimento de onda (QIAO, 1999).

A rede, na comutação óptica de rajadas, é dividida entre os comutadores ópticos de borda e os de centro da rede. A montagem das rajadas na borda da rede é feita com bits ou pacotes que tenham determinadas características em comum, como o destino por exemplo (PAPADIMITRIOU, 2003). Algumas propostas tem sido apresentadas para comutação óptica de rajadas considerando o tráfego IP. O protocolo MPLS - *multiprotocol label switch* - (QIAO, 2000), (YOO, 2000), (DOLZER, 2001), (XU, 2001), (XU, 2002) e (DÜSER, 2002) foi a alternativa proposta para agregar conexões IP, transmitir a um

dados destino e otimizar o uso do canal, atribuindo um identificador (*label*) ao tráfego agregado. Dentre os vários tipos de MPLS estão, por exemplo, o MPλS, que utiliza o comprimento de onda como *label* e o LOBS (*labeled OBS*), que utiliza a rajada com *label* (QIAO, 2000).

Neste trabalho é proposto um esquema de montagem da rajada na borda da rede, a partir de quadros de vídeo denominado *FtB* (*frame to burst*) (SANTOS, 2003b) e (SANTOS, 2003c). Essa proposta será melhor definida ainda nesta seção.

A FIG. 2.9 ilustra uma arquitetura genérica de um comutador óptico de rajadas. A comutação de rajadas funciona da seguinte maneira. Na borda da rede, após mon-

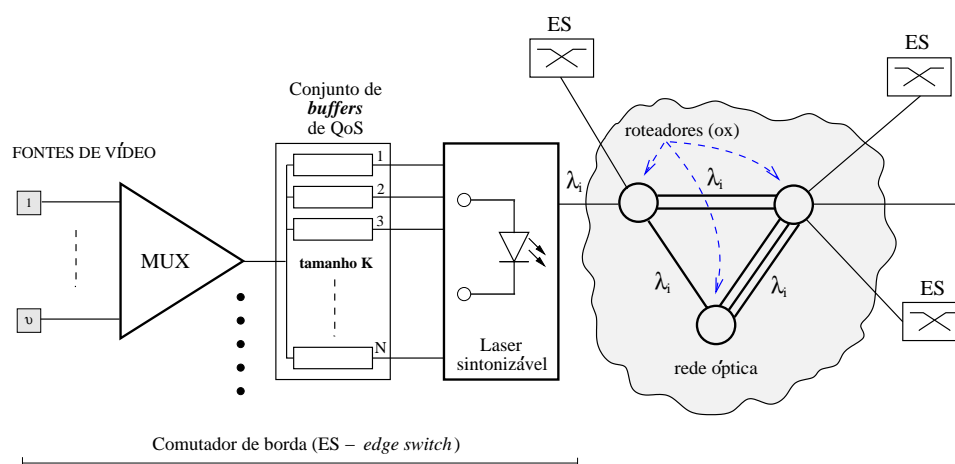


FIG. 2.9: Arquitetura genérica de rede OBS com comutador de borda

tada, a rajada é convertida para o meio óptico, através da atribuição de um canal de comprimento de onda ou caminho de luz. No meio óptico, a rajada é transmitida sem qualquer conversão adicional, até alcançar o destino, quando voltará ao meio eletrônico sendo desmontada para recuperação dos bits originais. Durante a montagem da rajada, na borda da rede, é feita a reserva de comprimento de onda. Um pacote de controle é enviado em um canal de controle ao longo da rede, fazendo a reserva dos caminhos de luz. Na passagem do pacote de controle, os roteadores da rede atualizam-no com informações referentes a estimativa de tempo de chegada da rajada. A reserva não necessariamente deverá ser confirmada, dependendo do protocolo utilizado. O pacote de controle é convertido para o meio eletrônico nos roteadores intermediários da rede. Por este motivo, o pacote deverá ser enviado antes da rajada, com tempo suficiente para ser processado nos roteadores da rede. Além disso, existem os retardos introduzidos nas conversões opto-eletrônicas em cada roteador. Apenas o pacote de controle, ou cabeçalho da rajada, sofre conversões para o meio eletrônico no interior da rede. A rajada após convertida

para o meio óptico, lá permanece durante toda a transmissão, só retornando ao meio eletrônico no destino. Assim, o comprimento de onda onde a rajada é transmitida, fica alocado apenas durante o período necessário para a transmissão da rajada, adicionado a uma margem de segurança, sendo liberado tão logo a rajada alcance o destino.

A principal vantagem da comutação óptica de rajadas, é que não há necessidade de armazenamento das rajadas nos roteadores ópticos dentro da rede (TURNER, 1999), dispensando o uso de *buffers* no interior da rede. No entanto, não se consegue aproveitar a banda passante disponível no meio óptico como na comutação de pacotes. Teoricamente, o tamanho da rajada pode ser ilimitado (TURNER, 1999). Quanto maior a rajada maior será a utilização do canal, pois menor será a relação entre pacote de controle e campo de dados. Entretanto, as aplicações com requisitos estritos de retardo máximo e *jitter*, conforme especificado em (ONVURAL, 1995), não devem utilizar este tipo de comutação.

O dimensionamento do tamanho das rajadas deve ser um compromisso entre a máxima utilização do canal e os limites de retardo máximo das aplicações. Quando o número de fontes multiplexadas (que geram os bits para montar a rajada) na borda for insuficiente para preencher uma rajada em tempo razoável, deve ser implementado um limite máximo de tempo de montagem da rajada. Caso contrário implicaria em um retardo inaceitável para algumas aplicações. O tempo de montagem das rajadas é relativamente alto, quando comparado à duração de um pacote, da ordem de centenas de μs a dezenas de ms . Esse tempo é compatível com os componentes ópticos disponíveis atualmente.

No APÊNDICE 2 mostraremos alguns detalhes dos componentes ópticos, analisando a viabilidade de implementação de OPS e OBS. Os requisitos de qualidade de serviço de algumas aplicações são apresentados na Seção 2.6.

Nossa proposta de montagem da rajada na borda da rede, a partir de quadros de vídeo (FtB) é ilustrada na FIG. 2.10. Os bits que compõem os quadros das seqüências de vídeo, irão montar a rajada. No destino, os quadros de vídeo são remontados, pela extração dos bits da rajada. Os quadros de vídeo são provenientes de distintas fontes de vídeo. Na montagem da rajada, as fontes estão sendo multiplexadas, possibilitando um ganho estatístico no uso do canal óptico, o comprimento de onda que será alocado para transmissão da rajada. A chegada do primeiro bit ao comutador óptico na borda da rede dispara a contagem de tempo para o término de montagem da rajada e envio ao servidor.

O objetivo deste trabalho é avaliar o desempenho do comutador óptico de rajadas para suporte ao tráfego de vídeo com dependência temporal. Consideramos que uma vez que a rajada esteja dentro da rede óptica, não há perda de informação. A perda acontece

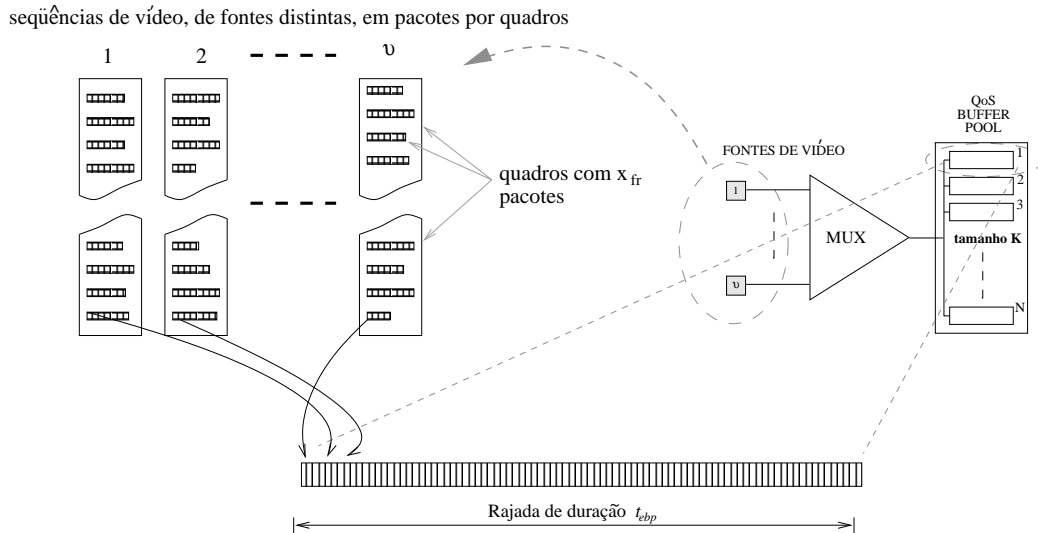


FIG. 2.10: Esquema de montagem da rajada na borda do comutador OBS

apenas na borda da rede, na atribuição do comprimento de onda, quando a rajada está pronta para ser enviada, mas o comprimento de onda reservado não está disponível. Essa probabilidade de perda pode ser levada a zero, se considerarmos a possibilidade de transmissão dos dados em uma rajada posterior e a implementação de esquema de qualidade de serviço, com classes de prioridade. A utilização do canal de comprimento de onda em uma rede de comutação de rajadas pode ser alta, se projetada adequadamente, com pequena probabilidade de perda de rajadas, obtendo-se um bom ganho estatístico sem armazenamento das rajadas nos nós intermediários da rede (TURNER, 1999).

A maioria dos estudos sobre a comutação óptica de rajadas têm sido feitos sob o ponto de vista de protocolos de reserva, alocação de comprimentos de onda e implementação de classes de serviço para tráfego IP e MPLS (QIAO, 2000), (YOO, 2000), (DOLZER, 2001), (XU, 2001), (XU, 2002) e (DÜSER, 2002).

Para a reserva de comprimento de onda em OBS, vários protocolos têm sido propostos. Esses protocolos são similares ao FRP - *fast-reservation protocol*, proposto por Boyer em (BOYER, 1992) para o meio eletrônico.

No TAG (*Tell and Go*), um sinal de controle faz a reserva de comprimento de onda sem confirmação, e após o envio da rajada outro sinal de controle é enviado para liberar o comprimento de onda reservado.

O IBT (*In Band Terminator*), utiliza um pacote delimitador dentro da própria rajada, que irá liberar o comprimento de onda reservado ao término do envio da rajada. Esses dois protocolos foram estudados para redes eletrônicas e posteriormente para redes

ópticas, conforme apresentado em (QIAO, 2000).

No RFD (*reserve a fix duration*) a reserva de comprimento de onda é feita para uma determinada duração, cuja estimativa é explicitada no pacote de controle. Ao término do período reservado, o comprimento de onda é liberado.

O JET (*Just enough time*), apresentado em (YOO, 2000) e (QIAO, 2000), tem como base o RFD, com a introdução de um retardo na reserva do comprimento de onda. Esse protocolo também utiliza um esquema de *offset time* para implementar classes de QoS. Em (XU, 2002), Xu propõe um método de cálculo do *offset*. Além disso, também propõe vários protocolos OBS e os analisa sob o ponto de vista de desempenho, PLR e retardo.

Em (IZAL, 2002) Izal e Aracil apresentam um estudo considerando a influência do tráfego com características de auto-similaridade na comutação óptica de rajadas. Mas o estudo avalia a perda nos nós do centro da rede óptica, além de considerar o intervalo entre rajadas como Poisson e a distribuição do tamanho das rajadas como Gaussiana.

2.6 PARÂMETROS DE DESEMPENHO E REQUISITOS DE QOS PARA APLICAÇÕES DE VÍDEO

O processo de comutação de pacotes ou de comutação de rajadas, introduz retardos variados para as conexões de tráfego, dependendo da arquitetura utilizada na rede. Além disso, pode haver perda de pacotes e o tráfego sofrer alterações devido ao problema de contenção por congestionamento.

Algumas aplicações possuem restrições quanto a requisitos de qualidade de serviço tais como perda (PLR), retardo e *jitter*. Para o IP a qualidade de serviço está geralmente relacionada à disponibilidade de largura de banda (taxa de transmissão) e não há outras exigências mais estritas. No entanto, para aplicações de vídeo, por exemplo, outras exigências devem ser consideradas, além de banda disponível. Existem especificações de retardo máximo que um pacote pode sofrer na rede, assim como o *jitter*. Também há o requisito quanto a perda de pacotes que a aplicação tolera. A TAB.2.1 obtida de (ONVURAL, 1995), ilustra os principais requisitos de algumas aplicações.

TAB. 2.1: Requisitos de retardo e *jitter* máximos para aplicações de áudio e vídeo

Tipo de aplicação	Retardo (ms)	<i>Jitter</i> (ms)
Vídeoconferência 64 kbps	300	130
Vídeo NTSC MPEG 1.5 Mbps	5	6.5
Vídeo HDTV 20 Mbps	0.8	1

Além dos requisitos exigidos pelas aplicações, o processo de comutação de pacotes ou montagem da rajada pode modificar o formato da seqüência de vídeo, alterando a seqüência original. O tipo de distribuição do tráfego VBR é o principal fator de imprevisão do comportamento do desempenho das redes ópticas e eletrônicas. Além disso, fatores como o grau de dependência temporal existente entre pacotes de uma mesma conexão, poderá causar um forte impacto no desempenho/dimensionamento de comutadores. O tráfego de vídeo foi escolhido para a avaliação do desempenho dos comutadores ópticos devido a presença de dependência temporal intrínseca a codificação. Além disso, o tráfego de vídeo apresenta alta variabilidade em termos de distribuição e taxas de transmissão. Na Seção 3.2 apresentamos modelos usados para representar tráfego de vídeo assim como parâmetros de processos estocásticos que caracterizam esses modelo. São tais parâmetros, como o grau de dependência temporal H , também abordado na Seção 3.2, que devem ser verificados se não sofrem alterações durante a comutação.

2.7 RESUMO

Neste capítulo foram apresentados os principais conceitos de comutação de comprimentos de onda, pacotes e rajada. Também apresentamos os principais conceitos envolvendo a comutação óptica nas redes WDM e os comutadores ópticos de pacotes e rajadas, que serão objeto de análise em nosso estudo, assim como as principais arquiteturas propostas para sua implementação.

Nas arquiteturas de comutadores ópticos de pacotes pudemos ver as diferentes formas de resolver o problema da contenção. As restrições tecnológicas na implementação dos comutadores ópticos também foram apresentadas, assim como as alternativas disponíveis para contorná-las.

Também foram apresentados os requisitos de qualidade de serviço exigidos por algumas aplicações e serviços de vídeo, uma vez que nossa avaliação de desempenho dos comutadores de pacotes e rajadas será feita para suporte ao tráfego de vídeo com dependência temporal.

No Capítulo 3 apresentamos os modelos analíticos e de simulação considerados na avaliação de desempenho dos comutadores OPS e OBS. O desempenho é avaliado em termos de PLR, *jitter* e retardo. Verificamos também se o parâmetro H do tráfego de vídeo foi alterado no processo de comutação. E nos comutadores OPS, obtemos o número de pacotes circulantes nas FDLs. Além disso, procuramos dimensionar arquiteturas de comutadores ópticos, através de *buffer* (OBS) ou FDLs e/ou TWCs (OPS). Em nosso es-

tudo, o tráfego de vídeo é representado pelos modelos de tráfego $M/G/\infty$ (KRUNZ, 1998) e fBm (*fractional Brownian motion*) (MANDELBROT, 1968). Esses modelos também são apresentados no Capítulo 3.

3 AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE COMUTADORES ÓPTICOS

3.1 INTRODUÇÃO

O objetivo deste capítulo é apresentar os modelos analíticos e de simulação considerados na avaliação do desempenho dos comutadores ópticos de pacotes (OPS) e rajadas (OBS), quando submetidos ao tráfego de vídeo com dependência temporal.

Esse estudo também acarretará no dimensionamento dos *buffers* ópticos dos comutadores OPS, ou seja, FDLs e conversores de comprimento de onda, e dos *buffers* eletrônicos dos comutadores OBS. O dimensionamento deverá obter os melhores resultados em termos de PLR, retardo, *jitter* e complexidade expressa no número de componentes necessários ao comutador, para suporte ao tráfego de vídeo. Além disso, verificamos se o parâmetro H do tráfego de vídeo foi afetado pelo processo de armazenamento (FDLs) e comutação ópticos. Os parâmetros perda de inserção, taxa de extinção, PDL e diafonia (*crosstalk*) apresentados na Seção 2.2 não são considerados em nossa avaliação, pois nosso enfoque é a contenção.

Conforme apresentado no Capítulo 2, a principal vantagem dos comutadores ópticos de pacotes é otimizar o uso da grande banda passante disponível no meio óptico, evitando o desperdício presente na comutação de comprimentos de onda para tráfego com taxas variáveis (RAMASWAMI, 2002) (PAPADIMITRIOU, 2003).

A principal solução do problema da contenção por congestionamento nas redes ópticas WDM é realizada através de um *buffer* óptico. Este *buffer* geralmente é implementado por FDLs, podendo ainda utilizar os conversores de comprimento de onda (TWC). A contenção pode ocorrer quando dois ou mais pacotes são direcionados para mesma porta de saída no comutador e num mesmo instante. As FDLs são usadas face à indisponibilidade de memórias RAM²⁵ ópticas. Os TWCs²⁶ são utilizados para reduzir, ou até mesmo eliminar, o número de FDLs necessárias para resolver a contenção.

Como vimos, a comutação óptica de rajadas é uma solução intermediária entre a comutação óptica de pacotes e a de comprimentos de onda. Apesar de não se obter a

²⁵Utilizar um *buffer* implementado com memória RAM eletrônica é inviável pois introduziria um retardo inaceitável na conversão O-E-O no interior da rede.

²⁶Os TWCs são dispositivos ópticos muito caros e ainda estão em fase de desenvolvimento em laboratório (RAMASWAMI, 2002).

utilização ótima da banda passante, como na comutação óptica de pacotes, consegue-se uma razoável melhora quando comparada a comutação de comprimentos de onda ou de circuitos.

A comutação óptica de rajadas é uma solução temporária, até que sejam resolvidos os problemas com os dispositivos ópticos necessários a total comutação de pacotes. Neste tipo de comutação criou-se uma complexidade na borda da rede devido à montagem da rajada. Neste trabalho a rajada conterá os bits produzidos pelo processo de codificação das seqüências de vídeo. A rajada é montada em um *buffer* eletrônico através de um esquema quadro para rajada (FtB - *Frame to Burst*), proposto em (SANTOS, 2003b) e (SANTOS, 2003c). As principais características do FtB são: é apropriado para vídeo, mantém a QoS, mantém o grau de dependência temporal do tráfego e facilidade de implementação. Após a montagem, a rajada é convertida para o meio óptico, quando lhe é atribuído um comprimento de onda, durante um período suficiente para a transmissão da rajada. O objetivo é dimensionar o *buffer* eletrônico do comutador OBS, para suporte ao tráfego de vídeo.

Os principais estudos envolvendo os comutadores OPS e OBS, que se tem conhecimento até o momento, consideram o tráfego IP (QIAO, 2000), (DOLZER, 2001) e (SIRÉN, 2002). Protocolos de reserva de comprimentos de onda (YOO, 1997) e (DÜSER, 2002) foram estudados para OBS. Neste estudo, consideramos o desempenho dos comutadores ópticos para suporte a tráfego de vídeo com dependência temporal. Estudos mostram que diferentes tipos de tráfego²⁷ exibem propriedades de dependência temporal (LELAND, 1994), (CROVELLA, 1996), (RYU, 1996) e (GROSSGLAUSER, 1999). No tráfego de vídeo, essa dependência temporal é intrínseca ao processo de codificação (GARRETT, 1994) (BERAN, 1995)(COELHO, 1998) (PONTES, 2001) (PONTES, 2002).

Antes de descrever os modelos analíticos e de simulação dos comutadores ópticos, apresentamos os modelos de tráfego de vídeo. Neste trabalho, o tráfego de vídeo é representado pelos modelos $M/G/\infty$ (KRUNZ, 1998) e fBm (*fractional Brownian motion*) (MANDELROT, 1968). Esses modelos foram utilizados por capturarem adequadamente as estatísticas de primeira e segunda ordens de seqüências de vídeo reais com dependência de longo alcance. Estes modelos também são avaliados, segundo o parâmetro H , a função autocorrelação (FAC) e a distribuição em cauda pesada, comparando-os com trechos de seqüências de vídeos reais. Outros modelos de tráfego de vídeo são apresentados no APÊNDICE 4.

²⁷ *Word Wide Web* (WWW), VBR, TCP e Ethernet.

3.2 MODELOS DE TRÁFEGO DE VÍDEO COM DEPENDÊNCIA TEMPORAL

As novas tecnologias de armazenamento digital de vídeo e de sistemas interativos, impulsionaram a demanda de banda passante para serviços de vídeo, logo as redes ópticas WDM serão um interessante suporte a este tipo de tráfego. O tráfego de vídeo apresenta grau de dependência temporal intrínseco ao processo de codificação (BERAN, 1995) (GARRETT, 1994) (PONTES, 2001).

Apesar de Ryu (RYU, 1996) ter demonstrado que o tráfego com dependência de longo alcance não tem influência significativa no dimensionamento de *buffers* eletrônicos, ainda é interessante considerar modelos com essa propriedade no dimensionamento de *buffers* ópticos. Principalmente pelo fato de não se ter acesso aleatório aos bits armazenados nas FDLs.

Uma grande dificuldade para as pesquisas com engenharia de tráfego, é a obtenção de modelos precisos de tráfego de fonte e de rede. Um modelo de tráfego deve conter as estatísticas de primeira e segunda ordens, e ser tratável analiticamente na teoria de filas.

Em nosso estudo, utilizamos o modelo *restrito* $M/G/\infty$ e o *não-restrito* fBm. Esta restrição está relacionada à capacidade do modelo de representar o grau de dependência temporal, ou seja, $0 < H < 1$. Estes modelos vão representar as seqüências que irão alimentar o comutador a ser avaliado. Nesta seção, descrevemos e avaliamos os modelos de tráfego, verificando através do grau de dependência temporal, função autocorrelação (FAC) e distribuição de cauda pesada, se são adequados para representar tráfego de vídeo.

Esses modelos foram escolhidos por capturarem adequadamente a distribuição do tráfego de vídeo de seqüências reais, além da função autocorrelação, obtendo-se bons resultados (GUIMARÃES, 2002) e (SANTOS, 2003b). Outros modelos poderiam ser utilizados para representar o tráfego de vídeo com dependência temporal, como o *f-ARIMA* (*fractional Autoregressive Integrated Moving Average*) (BOX, 1970), e as *fontes on-off com cauda pesada* (LELAND, 1994). No entanto, não apresentam um desempenho tão bom na captura da distribuição como os modelos escolhidos. Esses modelos são apresentados no APÊNDICE 4. Dentre todos os modelos, o fBm é o único que consegue representar o parâmetro H em toda extensão, $0 < H < 1$.

Além desses modelos, podemos citar outros. O MRTM (*Markov-renewal-modulated transform-expanded-sample*) é apresentado em (MELAMED, 1998). Usado para representar tráfego vídeo com dependência de curto alcance, possui elevada complexidade computacional.

O MAP (*Markovian Approach for Model in Packet Traffic with LRD*) é aplicado para

modelar tráfego de vídeo LRD. No entanto, quando comparado a trechos de seqüências de tráfegos reais, não apresenta um bom desempenho (ANDERSEN, 1998).

O modelo apresentado em (JELENKOVIC, 1997) por Jelenkovic para representar tráfego de vídeo MPEG, com características de dependência de longo alcance e distribuição de cauda pesada, é impreciso na representação do processo.

E o DAR(1) (JACOBS, 1978), autoregressivo discreto, é adequado para representar tráfego de vídeo com dependência de curto alcance, mas não de longo alcance.

O grau de dependência temporal, em processos estocásticos, refere-se à correlação existente entre amostras de um processo. Os efeitos da dependência temporal estão em diversas áreas da ciência como economia, agronomia, química e engenharia (BERAN, 1998). Hurst (HURST, 1951), em seus estudos sobre o comportamento do nível e vazão de rios e intensidades de chuva, verificou os efeitos da dependência temporal presente também em outros fenômenos naturais.

Processos auto-similares tem sido utilizados para representar processos com dependência temporal. A definição de um processo auto-similar está relacionado à invariância na sua distribuição, para quaisquer incrementos do processo. Assim, um processo auto-similar apresenta dependência temporal, mas um processo com dependência temporal não necessariamente é auto-similar, embora em vários trabalhos sejam tratados como semelhantes. A seguir, veremos a definição matemática de um processo que apresenta dependência temporal e também descreveremos os processos auto-similares.

3.2.1 DEPENDÊNCIA TEMPORAL E PROCESSOS AUTO-SIMILARES

Seja um processo estocástico $X(t)$, estacionário, com variância finita e coeficiente de autocorrelação definido por:

$$\rho(k) = \frac{Cov[X(t), X(t+k)]}{Var[X(t)]}, \quad k = 0, 1, 2, \dots \quad (3.1)$$

A dependência temporal é a taxa com que $\rho(k)$ decai a zero para $k \rightarrow \infty$. A função $\rho(k)$ tem um comportamento assintótico dado por

$$\rho(k) \sim L(k)k^{2(H-1)} \quad (3.2)$$

onde $L(k)$ é uma função de variação lenta no infinito ($\lim_{k \rightarrow \infty} \frac{L(kx)}{L(k)} = 1 \forall x$). O Parâmetro de Hurst (H) implica na forma do decaimento de $\rho(k)$. Considerando processos de variância finita, H assume valores na faixa de $0 < H < 1$. Os valores de H classificam os processos estocásticos da seguinte maneira:

- Processos que apresentam dependência negativa ou anti-persistência: $0 < H < \frac{1}{2}$ - A função autocorrelação decai rapidamente a zero, resultando em:

$$\sum_{k=-\infty}^{\infty} \rho(k) = 0$$

- Processos que apresentam dependência de curto alcance (SRD - *Short Range Dependence*): $H = \frac{1}{2}$ - A função autocorrelação vai a zero de forma exponencial, resultando em:

$$\sum_{k=-\infty}^{\infty} \rho(k) = c$$

- Processos que apresentam dependência de longo alcance (LRD - *Long Range Dependence*): $\frac{1}{2} < H < 1$ - A função autocorrelação vai a zero lentamente, indicando alto grau de dependência até entre amostras distantes, resultando em:

$$\sum_{k=-\infty}^{\infty} \rho(k) = \infty$$

Um processo estocástico é denominado auto-similar se a sua distribuição é invariante, para quaisquer incrementos do processo. Beran define em (BERAN, 1998) que um processo estocástico $X(t)$ de parâmetro contínuo t é auto-similar, com parâmetro H , se seus incrementos

$$X(t_0 + t) - X(t_0) \stackrel{d}{\approx} \frac{1}{r^H} (X(t_0 + rt) - X(t_0)) \quad (3.3)$$

são semelhantes em distribuição ($\stackrel{d}{\approx}$), para qualquer t_0 , onde r é um fator de re-escalamento. Assim, o processo re-escalado $\frac{1}{r^H} X(rt)$ e o processo $X(t)$ têm a mesma distribuição, sendo estatisticamente idênticos ou auto-similares. A igualdade da Eq. 3.3 garante que $X(t)$ é não estacionário (excluindo-se o caso em que $X(t) \equiv 0$), pois a condição de estacionaridade implicaria em $X(t) \stackrel{d}{\approx} X(rt)$. Entretanto, (BERAN, 1998) demonstra que um processo auto-similar pode ser constituído de incrementos estacionários, obtidos por somas parciais. O processo é considerado como tendo incrementos estacionários se a distribuição de qualquer incremento $X(t_0 + \Delta t) - X(t_0)$ depende apenas do intervalo Δt . No APÊNDICE 5, são apresentados os estimadores usados para estimar o parâmetro H .

3.2.2 MODELO DE TRÁFEGO BASEADO NO MOVIMENTO BROWNIANO FRA- CIONÁRIO

O movimento Browniano fracionário (fBm - *fractional Brownian motion*) (MANDELROT, 1968) 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, ou seja:

$$\text{Var}[X(t_2) - X(t_1)] \propto |t_2 - t_1|^{2H}, \quad (3.4)$$

para $0 \leq t_1 \leq t_2$. O fBm é auto-similar com parâmetro de Hurst (H), ou seja, suas características estatísticas se mantêm para qualquer escala no tempo. O fBm é o único processo gaussiano H -sssi (*self-similar with self-similarity parameter and stationary increments*). Para quaisquer τ e $r > 0$,

$$[X_H(t + \tau) - X_H(t)]_{\tau \leq 0} \stackrel{d}{\approx} r^{-H} [X_H(t + r\tau) - X_H(t)]_{\tau \leq 0} \quad (3.5)$$

onde r é o fator de escala do processo. Sendo auto-similar, o processo apresenta características de dependência temporal dada pelo parâmetro H . $X_H(t)$ é completamente caracterizado por sua média (m), variância e H . Sua FAC é dada por

$$\rho(k) = \frac{1}{2}\sigma^2[(k+1)^{2H} - 2k^{2H} + (k-1)^{2H}]. \quad (3.6)$$

Seu comportamento assintótico é dado por

$$\rho(k) \sim H(2H-1)k^{2H-2} \quad (3.7)$$

para $k \rightarrow \infty$. A Eq. 3.7 mostra decaimento semelhante ao apresentado na Eq. 3.2, na definição de dependência temporal, com $L(k) = H(2H-1)$. Por definição, o fBm tem média nula e, assim, não se aplica diretamente a gerar seqüências para representar tráfego de vídeo. Norros (NORROS, 1994) propôs a discretização de um processo fBm, obtendo um modelo que representa um processo $A(t)$ com características em escala, com média e variância não nulas, adequado para se trabalhar como modelo de tráfego de vídeo. Tomando $A(t)$ como sendo o número de pacotes recebidos por um multiplexador até o instante t , temos

$$A(t) = mt + \sqrt{am}X_H(t), \quad (3.8)$$

onde m é a taxa média de chegada, $a = \text{Var}[A(t)]/(mt)^{2H}$ o coeficiente de variância e $H \in (\frac{1}{2}, 1)$ é o parâmetro de Hurst.

Norros demonstra em (NORROS, 1995) que o modelo $A(t)$ possui a propriedade de aditividade. 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 e H comuns e médias individuais m_i , pode ser expressa pela Eq. 3.8 onde $m = \sum_{i=1}^W m_i$ e $X_H(t)$ é um fBm com parâmetro H .

Esta propriedade prova que a superposição de processos fBm gera um novo processo fBm (NORROS, 1995). Norros também analisou a ocupação de um enlace de transmissão considerando tráfego de entrada representado por $A(t)$, taxa de enlace $C > m$ e *buffer* infinito $K(t)$ que pode ser dada por

$$K(t) = \sup_{s \leq t} (A(t) - A(s) - (t - s)C), \quad t \in (-\infty, \infty). \quad (3.9)$$

A função distribuição de $K(t)$ pode ser aproximada através de um limite inferior pela relação

$$P(K(t) > K) \geq Errr\left(\frac{(C - m)^H K^{1-H}}{\kappa(H)\sqrt{am}}\right) \quad (3.10)$$

onde $\kappa(H) = H^H(1-H)^{1-H}$ e $Errr(y) = P(Z > y)$ corresponde a função distribuição complementar de uma variável aleatória Gaussiana padronizada²⁸. A função $Errr(y)$ não possui expressão analítica fechada, mas pode ser aproximada por $Errr(y) \approx \exp(-y^2/2)$ e portanto,

$$P(K(t) > K) \approx \exp\left(\frac{(C - m)^{2H} K^{2-2H}}{2\kappa(H)^2 am}\right) \quad (3.11)$$

A Eq. 3.4.1 pode ser utilizada para obter a taxa C tal que o *buffer* $K(t)$ assuma valores acima de um limite K com probabilidade $\epsilon = P(K(t) > K)$. Neste caso, tem-se

$$C_A = m + (\kappa(H)\sqrt{-2 \ln \epsilon})^{1/H} a^{1/(2H)} K^{-(1-H)/H} m^{1/(2H)}. \quad (3.12)$$

Nas simulações efetuadas na dissertação, usamos um gerador de tráfego fBm implementado em (PONTES, 2000), baseado no algoritmo *Random Midpoint Displacement* (RMD) (BARNSELY, 1988).

3.2.3 MODELO DE TRÁFEGO BASEADO NO $M/G/\infty$

Um modelo de tráfego de vídeo usando o processo $M/G/\infty$ foi proposto por Marwan M. Krunz em (KRUNZ, 1998) e pretende ser um compromisso de representação de distribuição entre modelos Markovianos ($H = \frac{1}{2}$) e LRD ($H > \frac{1}{2}$). O modelo é representado por um servidor infinito com chegada Poisson de taxa média λ e tempo de serviço com distribuição G ($P[Z > t]$). A distribuição G obedece a seguinte relação:

²⁸A função $Errr(y)$ também é denominada função erro, e é dada pela expressão $Errr(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_y^\infty e^{-t^2/2} dt$.

$$P[Z > t] = \frac{\gamma(t) - \gamma(t+1)}{1 - \gamma(1)}, \quad t = 0, 1, \dots \quad (3.13)$$

onde $\gamma(t)$ é a função autocorrelação do processo $Z(t)$. Ou seja, o modelo é definido por (λ, G) .

A estrutura da função autocorrelação de uma seqüência de vídeo é modelada por

$$\rho(k) = e^{-\beta\sqrt{k}}, \quad k = 0, 1, 2, \dots \quad (3.14)$$

onde o parâmetro β é estimado a partir de uma seqüência de vídeo real.

Através da adequada escolha de G , consegue-se obter a autocorrelação da Eq.3.14 com $\frac{1}{2} \leq H < 1$. Esse modelo é classificado como restrito devido a faixa do parâmetro H que consegue representar. A FAC do processo $Z(t)$ está relacionada a covariância por $\gamma(t) = \frac{\Gamma(t)}{\Gamma(0)} = P[\hat{\sigma} > t] \quad t = 0, 1, 2, \dots$

A covariância do $M/G/\infty$ é definida por

$$\Gamma(h) = \delta^2 \gamma_H(t), \quad h = 0, 1, \dots \quad (3.15)$$

onde $H = 1 - \beta/2$ e β ($0 < \beta < 1$) e $\delta^2 > 0$ 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,

$$\gamma_H(t) \sim H(2H - 1)t^{2H-2}, \quad t \rightarrow \infty \quad (3.16)$$

Para encontrar a distribuição do tempo de serviço G do processo definido acima por (λ, σ_H) , temos que:

$$P[Z_H > z] = \frac{|z + 2|^{2H} - 3|z + 1|^{2H} + 3|z|^{2H} - |z - 1|^{2H}}{4(1 - 2^{2H-2})}, \quad z = 1, 2, \dots \quad (3.17)$$

Assim, o processo definido por (λ, σ_H) será um processo auto-similar com parâmetro H .

E como definido na Eq. 3.14

$$\rho(k) = e^{-\beta\sqrt{k}}, \quad k = 0, 1, 2, \dots \quad (3.18)$$

A distribuição G é relacionada à função autocorrelação pela expressão:

$$P[Z = k] = \frac{\rho(k-1) - 2\rho(k) + \rho(k+1)}{1 - \rho(1)} \quad (3.19)$$

Por definição dizemos que uma variável aleatória X tem distribuição com cauda pesada se

$$P(X > x) \cong cx^{-\alpha}, \quad x \rightarrow \infty. \quad (3.20)$$

onde $0 < \alpha < 2$ é o parâmetro de forma e c é uma constante positiva (LAW, 1982).

Para melhor modelar a distribuição marginal da seqüência de vídeo, é necessário que se faça uma transformação na distribuição original Poisson. Assim, 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-se a FAC (Eq. 3.14) estimada da seqüência de vídeo; ou seja, dado um $x^* > 0$

$$F_{PGP} = \begin{cases} F_G(x) & x \leq x^* \\ F_P(x) & x > x^* \end{cases} \quad (3.21)$$

O processo $M/G/\infty$ pode resultar em um comportamento LRD ou SRD, conforme a distribuição utilizada (KRUNZ, 1998); como está sendo feita a transformação usando Pareto, o processo apresentará um comportamento LRD.

No APÊNDICE 3, apresentamos o algoritmo sugerido em (KRUNZ, 1998), implementado em C para gerar o tráfego de vídeo. E no APÊNDICE 4 são apresentados outros modelos de tráfego.

3.3 MODELO DE AVALIAÇÃO PARA O COMUTADOR ÓPTICO DE PACOTES

As soluções propostas para a resolução de contenção em comutadores OPS podem utilizar *buffers* ópticos implementados através de FDLs e/ou conversores de comprimento de onda (TWC). Nossa análise será feita tomando como base a arquitetura genérica de comutador óptico de pacotes ilustrada na FIG.3.1. Essa arquitetura com *buffer* na saída foi escolhida pois apresenta melhor desempenho, em termos de PLR, que uma arquitetura com *buffer* na entrada, principalmente devido ao bloqueio HOL. Além disso, o *buffer* implementado com as FDLs em *feed forward*, como nessa arquitetura, proporciona uma atenuação do sinal óptico de forma praticamente homogênea (RAMASWAMI, 2002).

O objetivo é dimensionar o número de FDLs necessárias para se obter uma determinada PLR na multiplexação de um dado número de fontes de vídeo, em um comprimento de onda. Ou seja, quantas fontes de vídeo podem ser multiplexadas em um comprimento de onda, dados PLR e número de FDLs. Inicialmente, o dimensionamento do *buffer* é feito considerando-se apenas as FDLs para resolver a contenção. Depois, consideramos a utilização de FDLs e conversores de comprimento de onda. Além disso, verificamos se

o parâmetro H do tráfego de vídeo foi alterado no processo de armazenamento (FDLs) e comutação ópticos. Também avaliamos, o retardo e *jitter* introduzidos pelas FDLs, a utilização dos enlaces ópticos (ρ) e o número médio de pacotes que circulam nas FDLs. Essa última medida representa o retardo médio enfrentado pelo pacote.

A arquitetura OPS que investigamos é semelhante a apresentada em (DANIELSEN, 1998) com a grande diferença no modelo de avaliação. Naquele trabalho o autor considera um modelo de carga/utilização (ρ) com distribuição Poisson em cada enlace óptico. A carga ρ representa a taxa de utilização do canal, em cada entrada do comutador. Consideramos que o comutador óptico de pacotes está submetido ao tráfego de vídeo com dependência temporal originado de distintas fontes, independentes e homogêneas multiplexadas em um dado comprimento de onda. Assim, embora a arquitetura seja a mesma, o modelo a ser implementado é completamente diferente do estudado em (DANIELSEN, 1998).

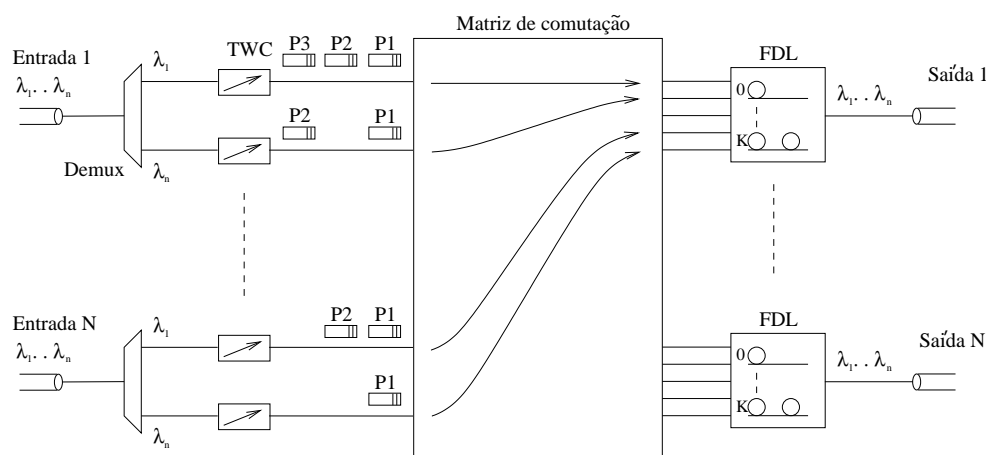


FIG. 3.1: Arquitetura genérica de comutador óptico de pacotes.

Nossa avaliação será apresentada em duas fases. Inicialmente, consideramos um modelo de "filas" com um comprimento de onda por porta de saída e com taxa de enlace óptico, C (por exemplo, 2.5 Gbps). Depois, avaliamos a mesma arquitetura usando vários comprimentos de onda por porta de saída, com taxa de enlace óptico, idênticas C por comprimento de onda. O tempo de atendimento foi considerado determinístico porque assumimos que os pacotes têm duração fixa²⁹. Para a taxa de enlace de 2.5 Gbps cada pacote³⁰ terá duração de $424 \times \frac{1}{2.5Gbps} = 169.6 \times 10^{-9}s$. Este é o tamanho do pacote

²⁹Considera-se pacotes com duração fixa para simplificar a implementação, principalmente no que se refere às funções de controle (RAMASWAMI, 2002). A padronização da duração do pacote ainda é tema de estudo.

³⁰Essa quantidade de bits do campo informação foi adotado devido à rede ATM

no meio óptico, que é a duração de um *slot*. A taxa de enlace de 2.5 Gbps apenas foi escolhida devido a restrições no ambiente de simulação. Ou seja, temos um "servidor" cujo tempo de atendimento, tem duração de $t_{slot} = \frac{424}{C} = 169.6 \times 10^{-9}s$. Note que o "servidor" tem capacidade de atender até $5.89 \times 10^6 \text{pacotes/s}$.

No modelo de análise, vamos considerar que a unidade básica (u.b) da FDL tem capacidade de armazenar 1 pacote, durante t_{slot} . Isso significa que essa unidade básica deve introduzir um retardo de 1 pacote a cada t_{slot} . Para conseguir introduzir esse retardo, a unidade básica de FDL deve ter um comprimento l , obtido da seguinte maneira (SINGH, 2001):

$$l = \frac{\zeta}{\eta} \times \frac{b}{C}$$

onde $\zeta = 3 \times 10^8 m/s$ é a velocidade da luz, $\eta = 1.5$ é o índice de refração³¹ na fibra, $b = 424$ é a quantidade de bits e $C = 2.5 \text{ Gbps}$ é a taxa de enlace óptico. Isto resulta em uma unidade básica de FDL de $l = 33.92 \text{ m}$ de comprimento. Logo, o modelo considera que cada FDL introduz um retardo múltiplo de t_{slot} ao pacote. Ou seja, convencionou-se que a FDL_i retarda um pacote de $i \times t_{slot}$, implicando que o mesmo ficará armazenado na FDL durante esse período. Essa FDL pode armazenar até i pacotes simultaneamente, um pacote em cada *slot*, de um total de i *slots*. A FDL_i terá um comprimento de $i \times 33.92 \text{ m}$. Por exemplo, a FDL_4 pode armazenar um pacote por 4 *slots*, que é o tempo necessário para percorrê-la. Nesse exemplo, pode-se ter até 4 pacotes dentro da FDL, simultaneamente, cada um percorrendo um determinado trecho diferente na FDL. A FDL_4 terá um comprimento de $4 \times 33.92 = 135.68 \text{ m}$.

Para apresentarmos o modelo de fila do comutador, suponhamos que em cada uma das N entradas do comutador óptico da FIG. 3.1, existam distintas fontes cujos pacotes têm como destino uma determinada porta de saída. E que v seja o somatório de todas as fontes com destino a essa porta. A primeira análise será feita considerando um comprimento de onda, e nesse caso os respectivos conversores de comprimentos de onda nas entradas da matriz de comutação, serão ajustados para o λ_1 correspondente à porta de saída em questão. A matriz de comutação comandará seus elementos de forma a alocar cada pacote em uma das K FDLs da porta 1. Um pacote poderá ser atendido diretamente, caso o enlace óptico esteja livre (através da FDL_0 .³²). Ou seja, temos v fontes de vídeo para serem multiplexadas no comprimento de onda λ_1 da porta 1, "disputando"

³¹O índice de refração de um material está relacionado à velocidade de propagação da luz no mesmo.

³²A FDL_0 tem comprimento infinitesimal e não retarda o pacote.

acesso a K FDLs e ao servidor. A FIG. 3.2 ilustra o detalhe da arquitetura de comutador óptico de pacotes e o equivalente modelo de fila do comutador.

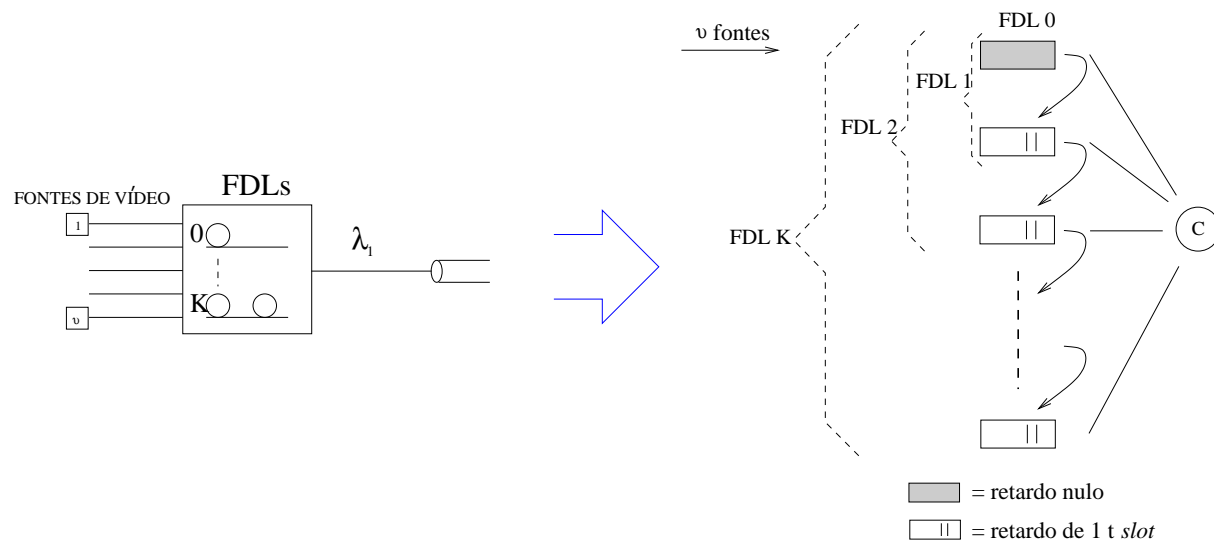


FIG. 3.2: Detalhe de comutador óptico de pacotes e equivalente modelo de fila.

O conjunto de K FDLs tem capacidade de armazenar $1 + 2 + 3 + \dots + (K - 1) + K = \frac{(K+1)K}{2}$ pacotes simultaneamente. Entretanto, a capacidade efetiva do *buffer* óptico é K , pois no comutador óptico tem-se acesso a K unidades básicas da FDL por t_{slot} (RAMASWAMI, 2002).

Um pacote ao chegar ao comutador óptico é imediatamente atendido se o enlace óptico estiver disponível, caso contrário terá até K chances de ser atendido, em instantes múltiplos de t_{slot} . O modelo de comutador óptico de pacotes considerado na análise está ilustrado na FIG.3.2. Ao final de cada *slot*, será verificado se o servidor está livre para atender o pacote armazenado na FDL. Se ao final de K tentativas o pacote não tiver sido atendido, será computada uma perda.

No modelo de simulação do comutador óptico examinado, as FDLs são representadas por um conjunto de "filas" que retardam o pacote por $1 t_{slot}$ cada. Ao término de $1 t_{slot}$, um determinado pacote armazenado em uma "fila" poderá ser atendido pelo servidor, caso este esteja disponível. Caso contrário, o pacote passará para a "fila" seguinte e o processo se repete até atingir a última "fila", quando então o pacote terá sua última chance. Se ao sair da última "fila" o servidor estiver ocupado, o pacote será perdido.

No modelo com vários comprimentos de onda por porta de saída, teremos um modelo de filas com vários servidores de taxa de enlace óptico C . Cada unidade básica de FDL, de $33.92m$, pode armazenar vários pacotes simultaneamente, um pacote em cada comprimento de onda. Em um comutador óptico com ε comprimentos de onda por porta

de saída, cada unidade básica de FDL pode ter no mesmo t_{slot} ε pacotes. Nesse caso, cada FDL i pode armazenar ε pacotes por i slots de tempo simultaneamente. Pode-se então reduzir o número de FDLs necessárias, mantendo-se a mesma capacidade de armazenamento que no caso de um comprimento de onda. Ou, em se mantendo o número de FDLs, o pacote agora terá $\varepsilon \times K$ chances de ser atendido. O modelo de simulação agora é implementado com ε servidores. Ao final de cada t_{slot} , será verificado se um dos ε servidores está livre para atender o pacote armazenado na FDL. Se ao final de $K \times \varepsilon$ tentativas o pacote não tiver sido atendido, será computada uma perda. A FIG.3.3 ilustra o modelo de comutador óptico de pacotes com vários servidores considerado na análise.

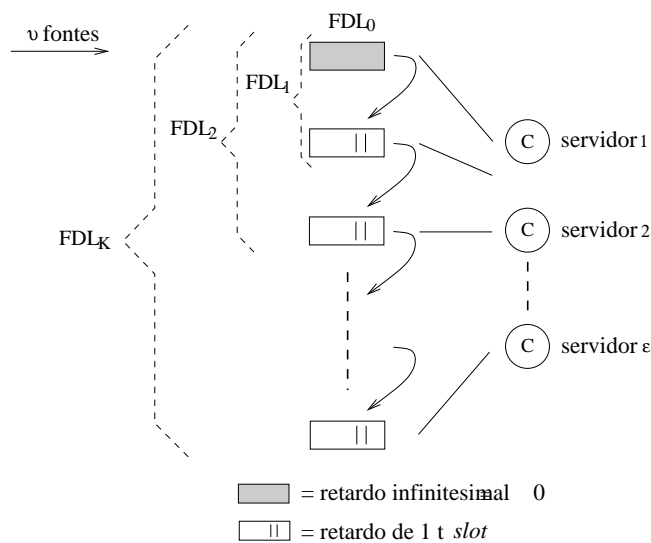


FIG. 3.3: Modelo do comutador óptico de pacotes com vários servidores usado na análise.

O modelo de fontes de tráfego utilizado, determina o comportamento da chegada dos pacotes. Os pacotes de cada fonte são oriundos das v fontes, que podem ter distribuição segundo os modelos de tráfego de vídeo $M/G/\infty$ e fBm .

3.4 MODELO DE AVALIAÇÃO PARA O COMUTADOR ÓPTICO DE RAJADAS

Nesta seção, apresentamos o modelo de comutador óptico de rajadas sob o qual faremos a análise de desempenho. A maioria dos estudos sobre a comutação óptica de rajadas têm sido feitos sob o ponto de vista de protocolos de reserva, alocação de comprimentos de onda e implementação de classes de serviço para tráfego IP e MPLS (QIAO, 2000), (YOO, 2000), (DOLZER, 2001), (XU, 2001), (XU, 2002) e (DÜSER, 2002). Em (DÜSER, 2002), por exemplo, Düser apresenta um esquema de alocação

dinâmica de comprimento de onda para transmissão de rajadas formadas a partir de tráfego IP. Em nosso estudo, avaliamos o desempenho do comutador óptico de rajada para suporte a tráfego de vídeo com dependência temporal.

A FIG.3.4 ilustra uma arquitetura OBS genérica que será considerada na avaliação. As rajadas são montadas em um *buffer* na borda da rede, no esquema FtB proposto em (SANTOS, 2003b) e (SANTOS, 2003c), com os quadros oriundos das sequências de vídeo. Nesse esquema, os bits que compõem os quadros das sequências de vídeo, irão montar a rajada na borda da rede. Os quadros de vídeo são provenientes de fontes de vídeo homogêneas, geralmente codificados em taxas de 25 quadros por segundo, ou seja $t_{quadro} = \frac{1}{25} = 40 \times 10^{-3} s$. Na escolha do tempo de montagem da rajada na borda da rede (t_{ebp}), deve-se considerar esse t_{quadro} . A chegada do primeiro bit ao comutador óptico na borda da rede dispara a contagem de tempo para o término de montagem da rajada e envio ao servidor. Durante a montagem da rajada é feita a reserva de comprimento de onda. Ao término da montagem, a rajada é convertida para o meio óptico através do laser sintonizável, quando lhe é atribuída o comprimento de onda reservado. Caso o comprimento de onda não esteja disponível, é computada uma perda ou a rajada pode ser armazenada em outro *buffer*. Na montagem das rajadas, as fontes estão sendo multiplexadas em um *buffer* eletrônico, possibilitando um ganho estatístico no uso do comprimento de onda que será alocado para transmissão da rajada. O ganho estatístico é possível, uma vez que as fontes de vídeo geram tráfego VBR. Caso o comprimento de onda seja alocado com exclusividade para cada fonte, como na comutação de comprimento de onda apresentada na Seção 2.3, haverá um grande desperdício de banda.

O objetivo inicial é dimensionar o tamanho K de um *buffer*, usado no comutador OBS para um determinado número de fontes de vídeo multiplexadas, a uma determinada taxa de enlace e PLR. O estudo é feito considerando um dos *buffers* do conjunto de *buffers* ilustrado na FIG.3.4. Com a utilização de um conjunto de *buffers*, pode-se também implementar um esquema de prioridades, possibilitando a criação de classes de serviço. Após o dimensionamento do tamanho K do *buffer*, avaliamos o *jitter*, o retardo, e também verificamos se o parâmetro H do tráfego de vídeo foi alterado no processo de montagem da rajada.

3.4.1 MODELO ANALÍTICO PARA AVALIAÇÃO DO OBS

No modelo usado para a avaliação de desempenho do OBS, os bits provenientes das fontes de vídeo são multiplexados previamente. O tempo entre chegada dos bits na fila

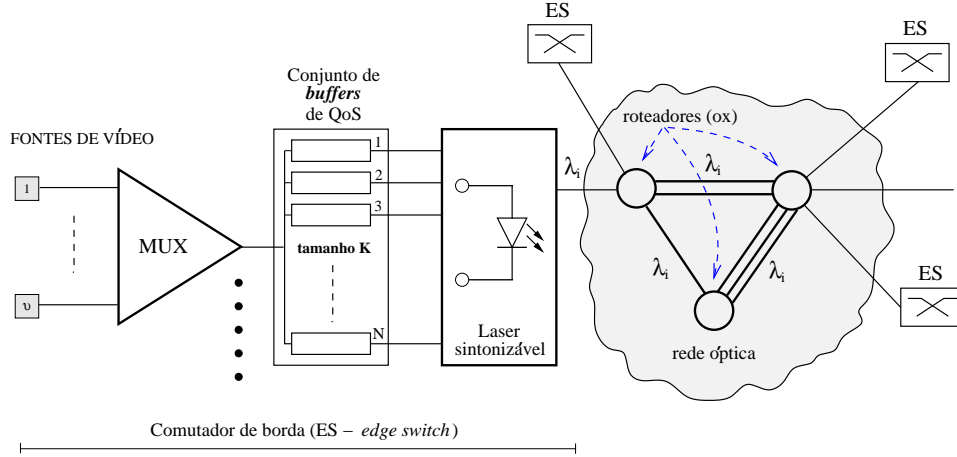


FIG. 3.4: Arquitetura genérica de rede OBS com comutador de borda

é representado pela distribuição dos modelos de tráfego $M/G/\infty$ e fBm. O servidor é o enlace óptico, no qual o comutador transmitirá a rajada, com tempo de atendimento determinístico D . Nessa fila, o *buffer* tem tamanho K , em bits, onde as rajadas são montadas. O tempo de atendimento é a soma do tempo de montagem da rajada, mais o tempo de transmissão, no qual o comutador processa cada bit da rajada e converte para o meio óptico, na atribuição do comprimento de onda à rajada.

Os bits provenientes dos quadros das seqüências de vídeo, de fontes independentes e homogêneas, vão montar a rajada. A rajada será considerada pronta para ser transmitida (t_f) quando, a partir do instante de chegada do primeiro bit ao *buffer* (t_{p1}), decorrer t_{ebp} s, ou seja:

$$t_f = t_{p1} + t_{ebp}$$

O valor de t_{ebp} é estabelecido como sendo o tempo total necessário para transmitir K bits, com duração de $1/C$ segundos por bit, onde C é a taxa de serviço do servidor em *bit/s*, ou seja, a taxa do enlace óptico. Então,

$$t_{ebp}(s) = K \frac{1}{C} \quad (3.22)$$

Se, por exemplo, considerarmos uma taxa de 2.5 Gbps e um *buffer* na borda da rede de 2.12 Mbits, a rajada será considerada pronta para ser transmitida após $2.12 \times 10^6 \times \frac{1}{2.5 \times 10^9} = 848 \mu s$.

Deve ficar claro que, uma vez pronta a rajada e iniciada a transmissão, ela será processada até o fim, sem interrupção. A FIG. 3.5 ilustra o modelo do comutador óptico de rajadas.

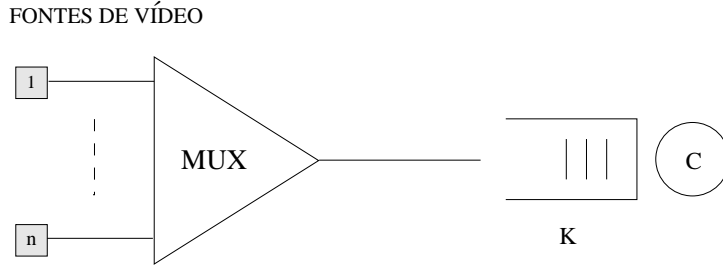


FIG. 3.5: Modelo do comutador óptico de rajadas considerado na análise de desempenho.

Durante o período de montagem da rajada t_{ebp} , $K(t)$ bits provenientes das fontes de vídeo chegarão ao comutador para compor a rajada. A duração total da transmissão da rajada pelo servidor será $T_x = K(t)1/C$.

A perda ocorrerá quando ao término da montagem da rajada atual, a rajada imediatamente anterior (K_{Ant}) que entrou no servidor, ainda não for completamente transmitida mantendo o servidor ocupado. Ou seja, o tamanho da rajada anterior, $K_{Ant}(t)$ em bits, excedeu o tamanho do *buffer* K . O tempo total de transmissão da rajada anterior (T_{xAnt}) será maior que o tempo de montagem da rajada atual, $T_{xAnt} > t_{ebp}$. Assim, a probabilidade de perda será dada por:

$$P(K(t) > K) \quad (3.23)$$

As seqüências de vídeo são representadas por modelos de tráfego de vídeo, que implicarão no comportamento de $K(t)$. Norros descreve em (NORROS, 1994) o comportamento do *buffer* de uma fila com taxa de serviço determinística (a taxa de enlace óptico), quando alimentado por um agregado de fluxos provenientes de fontes fBm.

Considerando o modelo fBm, a Eq. 3.4.1 apresentada na Seção 3.2, extraída da formulação apresentada em (NORROS, 1994), exprime a probabilidade de perda em função de $K(t)$:

$$P(K(t) > K) \approx \exp\left(\frac{(C - m)^{2H} K^{2-2H}}{2\kappa(H)^2 am}\right)$$

E com a Eq. 3.12 da mesma seção, podemos dimensionar o tamanho do *buffer* para um determinado número máximo de fontes multiplexadas e uma dada PLR com a relação:

$$C = n_{max}m + (\kappa(H)\sqrt{-2 \ln \epsilon})^{1/H} a^{1/(2H)} K^{-(1-H)/H} n_{max}m^{1/(2H)}. \quad (3.24)$$

onde:

n_{max} - número máximo de fontes que podem ser multiplexadas em um comprimento de onda.

m - taxa média de chegada.

$a = Var[K(t)]/(mt)^{2H}$ - coeficiente de variância.

$H \in (\frac{1}{2}, 1)$ - parâmetro H .

$\kappa(H) = H^H(1 - H)^{1-H}$.

C - taxa do enlace óptico em bps.

K - tamanho do *buffer* em bits.

ϵ - probabilidade de perda.

$K(t)$ - número de bits que chegam ao multiplexador até o instante t .

Este cálculo é válido considerando as fontes de tráfego de vídeo representadas pelo modelo fBm. O modelo $M/G/\infty$ não possui forma fechada, e o dimensionamento do *buffer* é obtido através de simulações. O retardo máximo sofrido por um pacote no esquema de montagem da rajada é dado por t_{ebp} .

3.5 COMPARAÇÃO ENTRE COMUTADORES OPS X OBS

Nos comutadores ópticos de pacotes, a principal vantagem é melhorar a utilização da banda disponível no meio óptico. Através do compartilhamento estatístico do meio, muitas fontes de tráfego podem ser multiplexadas, utilizando o meio óptico simultaneamente. Além disso, aumenta-se também a flexibilidade na rede WDM (HUNTER, 2000).

Na comutação óptica de pacotes há completa transparência ao formato e taxa de dados (DIXIT, 2000), adequados para suporte multitráfego, além de oferecer altas taxas de transmissão. Os pacotes na comutação, não necessariamente têm que ter o mesmo tamanho e a taxa do campo de dados pode ser variável, mesmo quando se trabalha com pacotes de duração fixa.

A comutação óptica de rajadas, não é tão flexível quanto a de pacotes. Os pacotes que formam as rajadas na borda da rede, necessariamente devem ter algo em comum, normalmente o destino. Como conseqüência, pode haver desperdício de banda, uma vez que há um tempo limite na montagem da rajada. Ou seja, se não há pacotes suficientes para completar a rajada dentro do período estabelecido, ela será enviada mesmo estando

parcialmente ocupada. Além disso, algumas aplicações possuem restrições quanto a parâmetros de qualidade de serviço como perda, retardo e *jitter* encontrados na rede, que talvez não sejam atendidas pela comutação óptica de rajadas. A montagem da rajada pode trazer alterações no tráfego original, modificando o parâmetro H da seqüência de vídeo e introduzindo *jitter*. Quando a rajada está pronta para ser transmitida, o caminho de luz reservado deve estar disponível, caso contrário, a rajada inteira é perdida. A desmontagem da rajada, para recuperação da informação também deve ser considerada. Além de introduzir retardo, a desmontagem da rajada requer um processamento adicional na borda do comutador óptico de destino. Nesse processo de montagem e desmontagem, além do retardo, é introduzido *jitter*.

No entanto, até o momento, a comutação óptica de rajadas é a solução que pode ser implementada, pois as restrições tecnológicas nos componentes ópticos inviabilizam a implementação dos comutadores ópticos de pacotes. As restrições tecnológicas estão na falta de RAMs ópticas, para implementar *buffers* ópticos, assim como nas portas ópticas usadas nas matrizes de comutação, nos TWCs e nos dispositivos para sincronizar os pacotes. O *buffer* óptico é implementado por FDLs e TWCs. As FDLs são volumosas e os TWCs são componentes caros e ainda estão em fase de desenvolvimento em laboratório (RAMASWAMI, 2002). As portas ópticas introduzem atenuação no sinal (RAMASWAMI, 2002), limitando assim o número de portas ópticas que podem ser cascadeadas. O processo de detecção, sincronismo e escrita no cabeçalho do pacote não é trivial. Ou seja, ainda é complicado armazenar, comutar, multiplexar e sincronizar pacotes no meio óptico (RAMASWAMI, 2002).

Na comutação de rajadas, a rajada passa para o meio óptico após ser montada, usando uma fonte laser sintonizável. Não é necessário implementar *buffers* ópticos e TWCs nos roteadores dentro da rede. E as portas ópticas usadas nestes roteadores podem ser mais lentas que as necessárias na comutação de pacotes.

Assim, a comutação de rajadas pode ser uma solução temporária, enquanto os problemas relacionados aos dispositivos ópticos necessários à implementação de comutadores OPS não são resolvidos. No entanto, há uma série de inconvenientes, principalmente os relacionados a parâmetros de QoS que podem não ser atendidos. Além disso, não se consegue melhorar a utilização da banda passante disponível no meio óptico, como na comutação OPS.

3.6 RESUMO

Neste capítulo, apresentamos os modelos de comutadores ópticos de pacote e rajadas considerados em nossa avaliação de desempenho, assim como a fundamentação teórica usada nos cálculos.

Para o comutador OPS, mostramos a arquitetura utilizada na avaliação, assim como justificamos as soluções adotadas na implementação do *buffer* óptico através de FDLs e conversores de comprimento de onda (TWC). Também apresentamos os cálculos usados no dimensionamento das FDLs e as considerações efetuadas na avaliação do modelo do comutador OPS.

O esquema FtB, utilizado na montagem de rajadas no comutador OBS, foi apresentado, assim como os cálculos envolvidos no dimensionamento do *buffer* eletrônico desse comutador.

Além disso, fizemos uma comparação entre os comutadores OPS e OBS, enfatizando as principais características de cada um.

Também apresentamos os processos fBm e $M/G/\infty$, representando os modelos de tráfego de vídeo para alimentar os comutadores ópticos, enfatizando a implementação do $M/G/\infty$, efetuada no decorrer do trabalho. Apresentamos ainda os principais conceitos envolvendo dependência temporal e processos auto-similares em processos estocásticos.

No Capítulo 4, apresentaremos os principais resultados obtidos com comutadores ópticos de pacotes e de rajadas, usando os modelos de tráfego de vídeo descritos neste capítulo.

4 RESULTADOS DA ANÁLISE DO DESEMPENHO COM OS COMUTADORES ÓPTICOS DE PACOTES E DE RAJADAS

Neste capítulo apresentamos os principais resultados da avaliação do desempenho de comutadores ópticos de pacotes e de rajadas, considerando o tráfego de vídeo com dependência temporal. Os modelos de comutadores analisados foram apresentados no Capítulo 3.

O resultado da avaliação do desempenho das duas arquiteturas, OPS e OBS, é apresentado em termos dos parâmetros retardo (máximo e médio), *jitter*, PLR e número de fontes multiplexadas em um enlace óptico. Neste capítulo, também examinamos se o grau de dependência (parâmetro H) das seqüências de vídeo foi afetado pelos *buffers* dos comutadores ópticos. O dimensionamento dos *buffers* ópticos para arquitetura OPS e OBS é também examinado neste capítulo.

No comutador OPS, este dimensionamento é expresso pelo número de FDLs e TWCs necessários para se multiplexar um determinado número de fontes de vídeo considerando uma taxa de perda de pacotes. No comutador OBS, determinamos o tamanho da rajada ou *buffer*, de forma a garantir os requisitos de QoS do tráfego de vídeo. As rajadas são montadas através de um novo esquema denominado FtB (*frame to burst*), proposto em (SANTOS, 2003b) e (SANTOS, 2003c). Com os resultados obtidos verificamos o número de FDLs necessárias no comutador OPS, para se obter um desempenho em termos de PLR similar ao do comutador OBS.

Os modelos de tráfego de vídeo foram avaliados segundo sua capacidade de representação do parâmetro H , a função autocorrelação (FAC) e da distribuição de cauda pesada. Os resultados obtidos para os modelos foram comparados aos das seqüências reais utilizadas em nossa análise.

Em estudos envolvendo os comutadores OPS e OBS, os autores consideram o tráfego IP (*Internet Protocol*) (SIRÉN, 2002), (QIAO, 2000) e (DOLZER, 2001) e protocolos de reserva de comprimentos de onda (DÜSER, 2002) e (YOO, 1997), para OBS. Ou, ainda, utilizam um modelo de carga (ρ) com distribuição Poisson (DANIELSEN, 1998) e (DANIELSEN, 1997), onde essa carga ρ representa a utilização do canal na entrada do *buffer* do comutador (*buffer* na saída).

Neste estudo, avaliamos o desempenho dos comutadores ópticos para suporte ao

tráfego de vídeo com presença de dependência temporal. Desta forma, a avaliação do desempenho dos comutadores ópticos é realizada em um cenário mais crítico. Isso porque os modelos de tráfego considerados ($M/G/\infty$ e fBm) apresentam distribuição de cauda pesada, grau de dependência temporal e uma grande variabilidade de taxas de codificação. A validação desses modelos é apresentada na próxima seção.

4.1 RESULTADOS DOS MODELOS DE TRÁFEGO DE VÍDEO

A validação dos modelos é feita verificando a capacidade de cada modelo de representar o parâmetro H , a FAC e a distribuição de cauda pesada de trechos de seqüências de vídeo reais. Os resultados dos modelos $M/G/\infty$ (KRUNZ, 1998) e fBm (*fractional Brownian motion*) (MANDELROT, 1968) foram comparados considerando os resultados obtidos com os trechos das seqüências (LRD) de vídeo codificadas: *StarWars*, em JPEG; *Silence of the Lambs (Silence)*, em H.263; e *Race*, em MPEG-1. Essas seqüências apresentam diferentes distribuições de cauda pesada, valores do parâmetro H maior que 0.8 e grande variabilidade de taxa de codificação.

As seqüências usadas em nosso experimento foram codificadas a 25 quadros por segundo. A seqüência original *StarWars* possui 171000 amostras, a *Silence*, 25861 amostras e a *Race*, 8192 amostras. Para estimar o parâmetro H foram utilizados os estimadores R/S e AV (*Abry-Veitch*), do pacote HEP (*Hurst Estimator Package*) (PONTES, 2000). O número de amostras das seqüências deve ser tal que minimize o erro na estimação ($|\hat{H} - H|$) do parâmetro H . Pela desigualdade de Chebyshev (LEON-GARCIA, 1994), pode-se calcular o número de amostras (n_A) necessárias, para minimizar a probabilidade de erro de estimação considerando um certo grau de confiabilidade da medida (γ). Ou seja, $P[|\hat{H} - H| \geq \epsilon] \leq \frac{1}{4n_A\gamma^2}$. Assim, com 8000 amostras temos a probabilidade de 0.05 % de que o erro na estimação do parâmetro H fique maior ou igual a 0.025. A TAB. 4.1 apresenta os parâmetros m , σ e H das seqüências originais. Esses resultados também foram apresentados em (GUIMARÃES, 2002). Outros resultados de estimação do parâmetro H para diversas seqüências e diferentes estimadores são discutidos em (PONTES, 2001).

Com os modelos de tráfego $M/G/\infty$ e fBm geramos uma biblioteca de seqüências de vídeo utilizando os parâmetros m , σ e parâmetro H das seqüências originais. Para gerar as seqüências baseadas no modelo $M/G/\infty$, implementamos em C++ o algoritmo sugerido em (KRUNZ, 1998) e apresentado no APÊNDICE 3. Para a geração das seqüências baseadas no modelo fBm foi utilizado o algoritmo *Random Midpoint Displacement* (RMD)

TAB. 4.1: Parâmetros das seqüências de vídeo originais.

Seqüência	m (Kbps)	σ (Kbps)	$\hat{H}(R/S)$	$\hat{H}(AV)$	número de amostras
<i>StarWars (JPEG)</i>	5558.2	1250.8	0.830	0.828	171.000
<i>Silence (H.263)</i>	891.6	344.09	0.822	0.820	25.861
<i>Race (MPEG-1)</i>	1804.8	537.79	0.870	0.888	8.192

(BARNSELEY, 1988).

As TAB. 4.2 e TAB. 4.3 ilustram os parâmetros das seqüências geradas com os modelos $M/G/\infty$ e fBm, respectivamente. Como podemos notar, as seqüências geradas com ambos os modelos apresentaram média m , σ e parâmetro H muito próximos dos valores originais.

TAB. 4.2: Parâmetros das seqüências geradas com o modelo $M/G/\infty$.

Seqüência	m (Kbps)	σ (Kbps)	$\hat{H}(R/S)$	$\hat{H}(AV)$
<i>StarWars (JPEG)</i>	5522.4	1311.6	0.898	0.831
<i>Silence (H.263)</i>	902.5	329.9	0.835	0.801
<i>Race (MPEG-1)</i>	1905.9	619.7	0.881	0.875

TAB. 4.3: Parâmetros das seqüências geradas com o modelo fBm.

Seqüência	m (Kbps)	σ (Kbps)	$\hat{H}(R/S)$	$\hat{H}(AV)$
<i>StarWars (JPEG)</i>	5533.3	1291.9	0.831	0.831
<i>Silence (H.263)</i>	877.1	344.09	0.827	0.822
<i>Race (MPEG-1)</i>	1781.6	522.05	0.874	0.870

As curvas com a FAC obtida pelos modelos e para as três seqüências originais, *StarWars* (JPEG), *Silence* (H.263) e *Race* (MPEG-1) estão apresentadas nas FIGs. 4.1, 4.2 e 4.3, respectivamente. De uma maneira geral, a FAC apresentada para as três seqüências geradas com ambos modelos alcançaram boa representação. A FAC para a seqüência *StarWars* (FIG. 4.1) gerada pelo modelo $M/G/\infty$ se aproximou mais da original que a gerada pelo modelo fBm. Esta seqüência apresenta FAC sub-exponencial que o modelo $M/G/\infty$ consegue capturar bem, pois foi definida que a FAC é dada por $\rho(k) = e^{-\beta\sqrt{k}}$, $k = 0, 1, 2, \dots$, onde β é estimado a partir da seqüência de vídeo real. Para a seqüência de vídeo *Silence* (vide FIG. 4.2) os dois modelos apresentam resultados de FAC semelhantes. Entretanto, no caso da seqüência de vídeo *Race*, ambos modelos não conseguem representar bem a FAC original, que apresenta uma componente periódica devido à estrutura GoP (*Group of Pictures*) das seqüências codificadas em MPEG.

As distribuições de cauda pesada dos modelos e das três seqüências originais podem

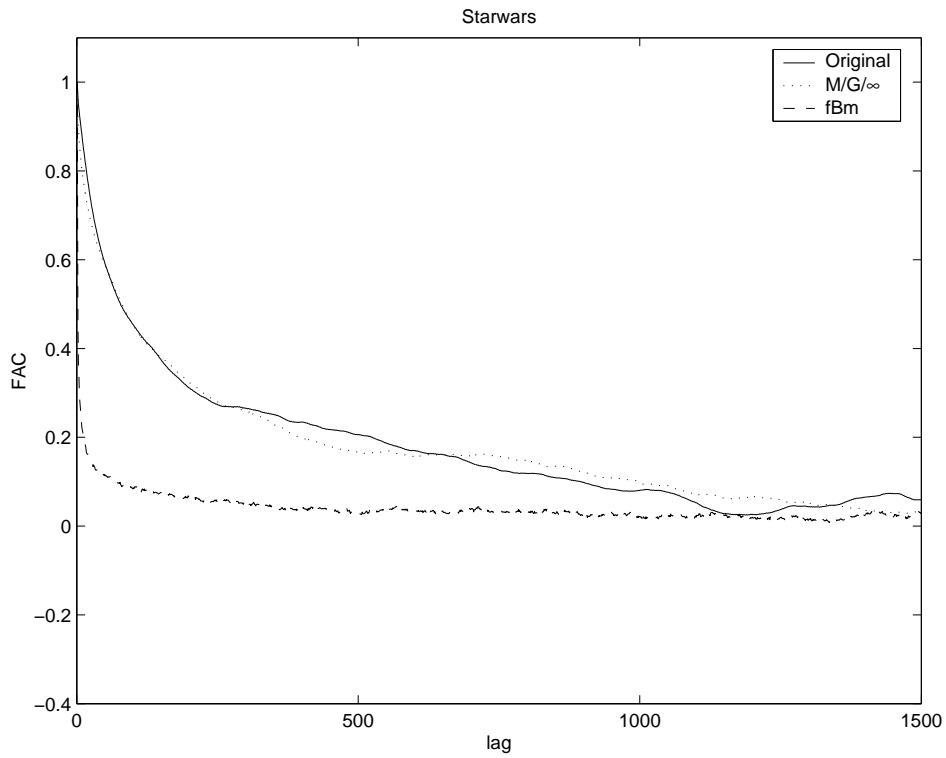


FIG. 4.1: FAC para a seqüência *StarWars* (JPEG).

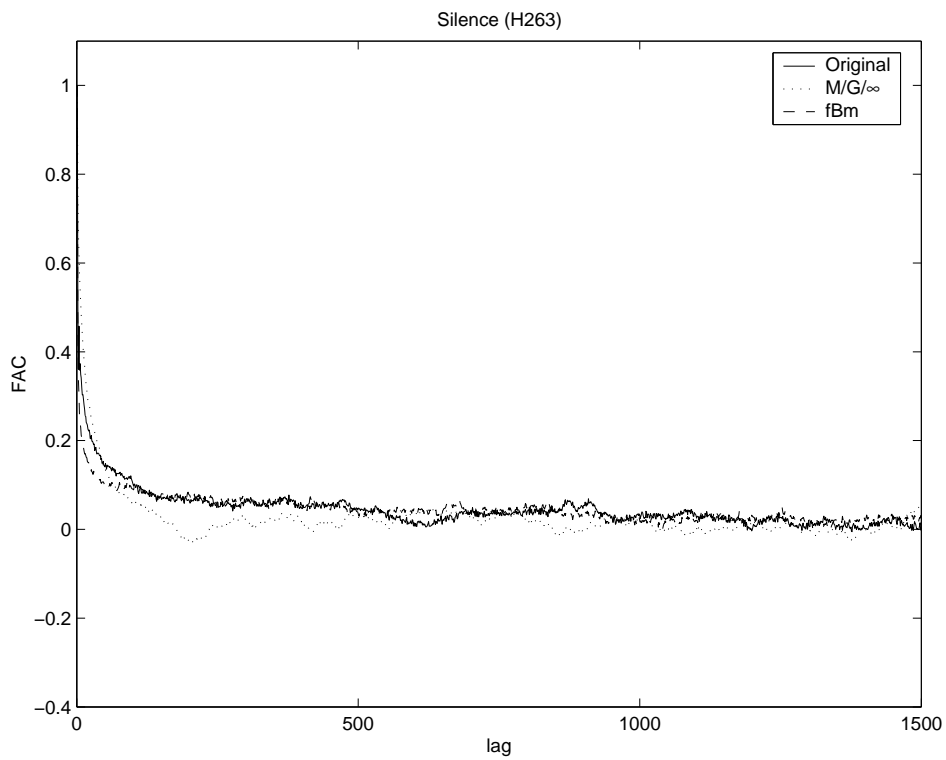


FIG. 4.2: FAC para a seqüência *Silence* (H.263).

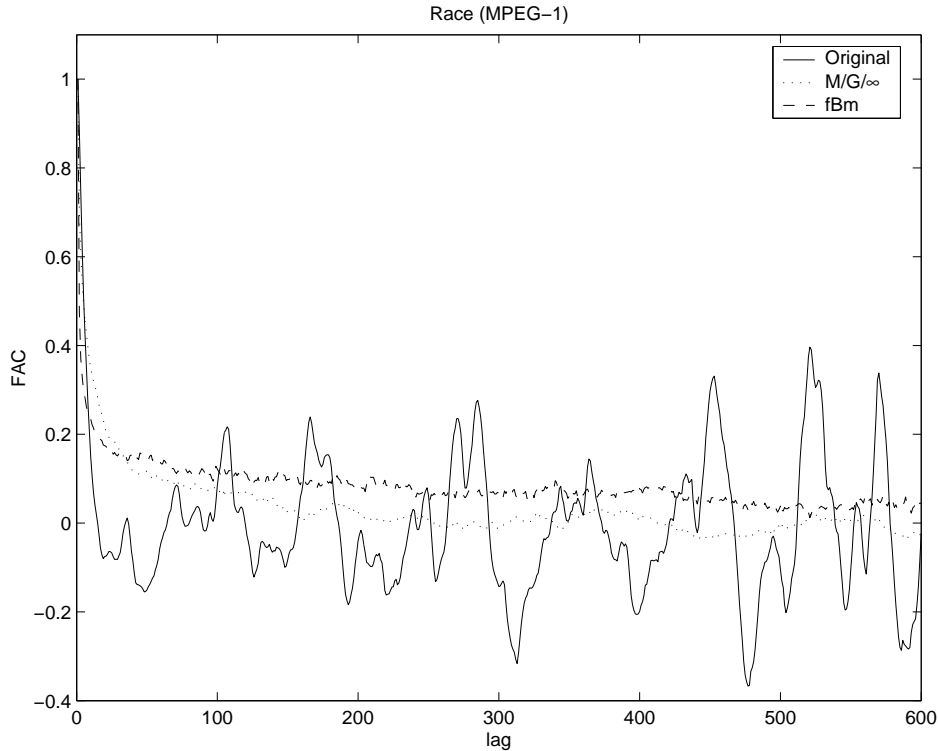


FIG. 4.3: FAC para a seqüência *Race* (*MPEG-1*).

ser comparadas nas FIGs. 4.4, 4.5 e 4.6. O modelo $M/G/\infty$ usa a transformação de Poisson para Gamma/Pareto (F_{PGP}) para se ajustar à distribuição das seqüências de vídeo reais. A distribuição de Pareto é uma importante distribuição de cauda pesada e se adequa bem para capturar as distribuições de cauda pesada de processos LRD ($H > \frac{1}{2}$). Os modelos $M/G/\infty$ e fBm apresentaram resultados semelhantes e se aproximaram da distribuição de cauda pesada das seqüências originais *StarWars*, *Silence* e *Race*.

As seqüências de vídeo utilizadas apresentam características LRD. Essas seqüências foram escolhidas para fazermos na análise de desempenho dos comutadores ópticos OPS e OBS com tráfego com forte relação de dependência temporal, mesmo no infinito. Note que o modelo de tráfego $M/G/\infty$ representa apenas seqüências com $H \geq \frac{1}{2}$, sendo esta a sua principal limitação. Já o modelo fBm não tem essa restrição e consegue representar seqüências com $0 < H < 1$. Estes dois modelos são considerados (GUIMARÃES, 2002) e (SANTOS, 2003a) como limites superiores (fBm) e inferiores ($M/G/\infty$) em termos de desempenho.

Seqüências que possuem $H < \frac{1}{2}$, apresentando o efeito de anti-persistência, são fortemente centradas em torno da média, e logo, espera-se um menor impacto no desempenho quando comparado às seqüências LRD (COELHO, 1998). Este tipo de seqüência deverá portanto ser interessante para obtenção de um melhor cenário de multiplexação para as

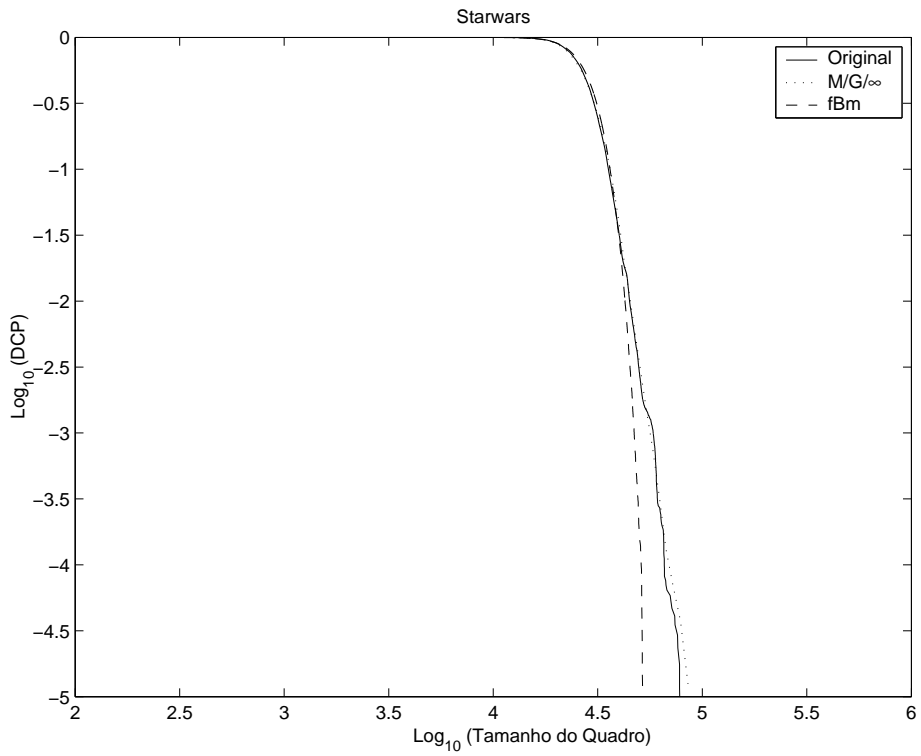


FIG. 4.4: Distribuição para a seqüência *StarWars* (JPEG).

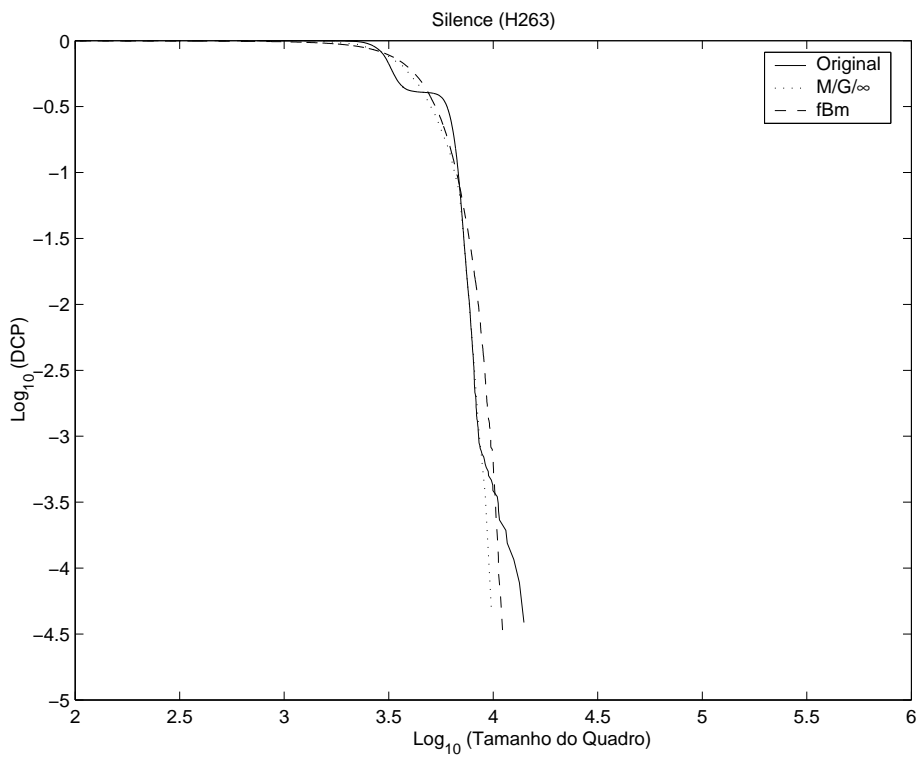


FIG. 4.5: Distribuição para a seqüência *Silence* (H.263).

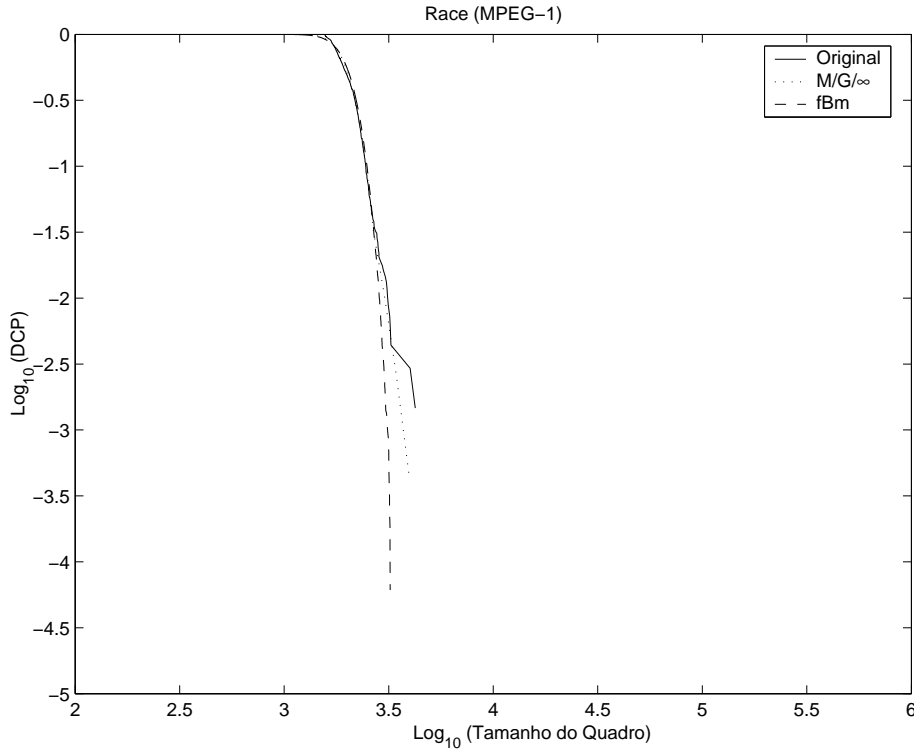


FIG. 4.6: Distribuição para a seqüência *Race* (*MPEG-1*).

futuras redes WDM.

Em resumo, pelos resultados de representação do parâmetro H , da FAC, e da distribuição de cauda pesada, dos modelos de tráfego $M/G/\infty$ e fBm obtidos, constatamos que os mesmos são adequados para representar tráfego de vídeo com dependência temporal de longo alcance.

4.2 RESULTADOS DA AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DO COMUTADOR ÓPTICO DE PACOTES

Os resultados apresentados a seguir foram obtidos com o modelo de simulação do comutador óptico de pacotes quando alimentado por fontes de tráfego de vídeo com dependência temporal. Pelos resultados, também verificamos o impacto causado no desempenho do comutador óptico de pacotes pela utilização de FDLs na implementação do *buffer* óptico. O número de FDLs e/ou TWCs necessários para dimensionar o *buffer* do comutador OPS foi obtido considerando diferentes valores de PLR e ρ . E, ainda, foi determinado o número de FDLs necessárias para se obter uma PLR similar a do comutador OBS. Os resultados de retardo (máximo e médio), *jitter* e PLR encontrados, também são avaliados segundo requisitos de QoS das aplicações de serviços de vídeo.

Para avaliar o impacto do tráfego com dependência no desempenho do comutador, comparamos os resultados do número máximo de fontes que podem ser multiplexadas para um determinado número de FDLs e PLR, obtidos com os dois modelos de tráfego, $M/G/\infty$ e fBm. A seguir é apresentado o cenário considerado na avaliação do desempenho do comutador óptico de pacotes.

4.2.1 CENÁRIO DA ANÁLISE DE DESEMPENHO DO COMUTADOR ÓPTICO DE PACOTES

- Taxa de enlace óptico $C = 2.5$ Gbps.
- Tamanho do pacote³³: $169.6 \times 10^{-9}s$ (vide Seções 2.4 e 3.3).
- Multiplexação por comprimento de onda síncrona (*slotted*) (SWDM).
- $t_{slot} = 169.6 \times 10^{-9}s$.
- Unidade básica de FDL de 33.92 m de comprimento.
- Seqüências³⁴ de vídeo utilizadas, geradas pelos modelos $M/G/\infty$ e fBm:
 - *StarWars* (JPEG)
 - *Silence* (H.263)
 - *Race* (MPEG-1)
- Estimadores do parâmetro H :
 - R/S.
 - AV com filtro *Daubechies* (DAUBECHIES, 1992) 12 e escalas de 3 a 10.

Para avaliar o desempenho do comutador óptico, introduzimos um modelo representando uma das portas de saída e as FDLs que dão acesso à esta, na resolução de contenção. Primeiramente consideramos que a contenção é resolvida apenas com as FDLs (um comprimento de onda por porta de saída). Neste caso, a multiplexação das fontes será realizada dentro do comprimento de onda. Em seguida, avaliamos o desempenho do comutador óptico quando se utiliza FDLs e conversores de comprimento de onda na resolução de contenção (vários comprimentos de onda por porta de saída).

³³Consideramos que o campo de informação tem 424 bits, devido ao tamanho da célula ATM.

³⁴A média, desvio padrão e parâmetro H destas seqüências de vídeo estão apresentadas nas TABs. 4.2 ($M/G/\infty$) e 4.3 (fBm), respectivamente.

Os principais resultados do desempenho do OPS, para os dois modelos de tráfego, serão apresentados a seguir, segundo o seguinte cenário: (a) curvas PLR x FDL, (b) tabelas com retardo (máximo e médio), (c) *jitter*, (d) parâmetro H e (e) número de pacotes circulantes (retardo médio).

4.2.2 RESULTADOS DE PLR X FDL NO COMUTADOR ÓPTICO DE PACOTES COM UM COMPRIMENTO DE ONDA

As curvas a seguir mostram a PLR versus o número de FDLs utilizadas no comutador óptico de pacotes, com um comprimento de onda, para várias taxas de utilização (ρ) para as seqüências *StarWars* (JPEG), *Silence* (H.263) e RACE (MPEG-1), geradas com os modelos $M/G/\infty$ e fBm.

Na FIG. 4.7 podemos observar que, para a seqüência *StarWars* (JPEG) gerada com o modelo $M/G/\infty$, foram necessárias 50 FDLs para se conseguir multiplexar 360 fontes em um comprimento de onda ($\rho=0.8$) e obter uma PLR de 10^{-4} . Essas FDLs equivaleriam a 1696.0 m de fibra óptica ou retardo máximo de $8.48 \times 10^{-6}s$. Com ρ de 0.6 (270 fontes multiplexadas), foram necessárias 20 FDLs, o que representaria 678.40 m de fibra óptica e retardo máximo de $3.39 \times 10^{-6}s$. Na FIG.4.8, vemos que para a mesma seqüência *StarWars* mas representada pelo modelo fBm, foram necessárias apenas 20 FDLs para multiplexar 360 fontes em um comprimento de onda ($\rho=0.8$) e obter PLR de 10^{-4} . Para ρ de 0.6 (270 fontes), foram necessárias 10 FDLs (339.2 m de fibra óptica). Logo, podemos constatar a importância de se considerar diferentes modelos de tráfego para representar o tráfego de vídeo. Nas próximas curvas, obtidas com as outras seqüências, também será observado isso.

Com a seqüência *Silence* (H-263) gerada pelo modelo $M/G/\infty$, observamos pela FIG. 4.9, que para se obter uma PLR de 10^{-4} ao se multiplexar 2240 fontes (ρ), foram necessárias 90 FDLs. Isso refere-se a 3052.8 m de fibra óptica, introduzindo um retardo máximo de $15.26 \times 10^{-6}s$. Para uma mesma PLR com ρ de 0.6 (1682 fontes multiplexadas) foram necessárias 25 FDLs, o que equivaleria a 848 m de fibra óptica. Essas 25 FDLs introduziriam um retardo máximo de $4.24 \times 10^{-6}s$. No entanto, conforme mostra a FIG.4.10, quando se utiliza a mesma seqüência *Silence* (H-263), mas gerada pelo modelo fBm, com apenas 20 FDLs, consegue-se multiplexar 2240 fontes ($\rho=0.8$) e para a mesma PLR de 10^{-4} . Com ρ de 0.6 (1682 fontes multiplexadas) e mesma PLR, foram necessárias 10 FDLs. No caso da seqüência *Silence* (H-263), assim como nos resultados obtidos com a *StarWars* (JPEG), fica claro o impacto que os diferentes modelos de tráfego ou

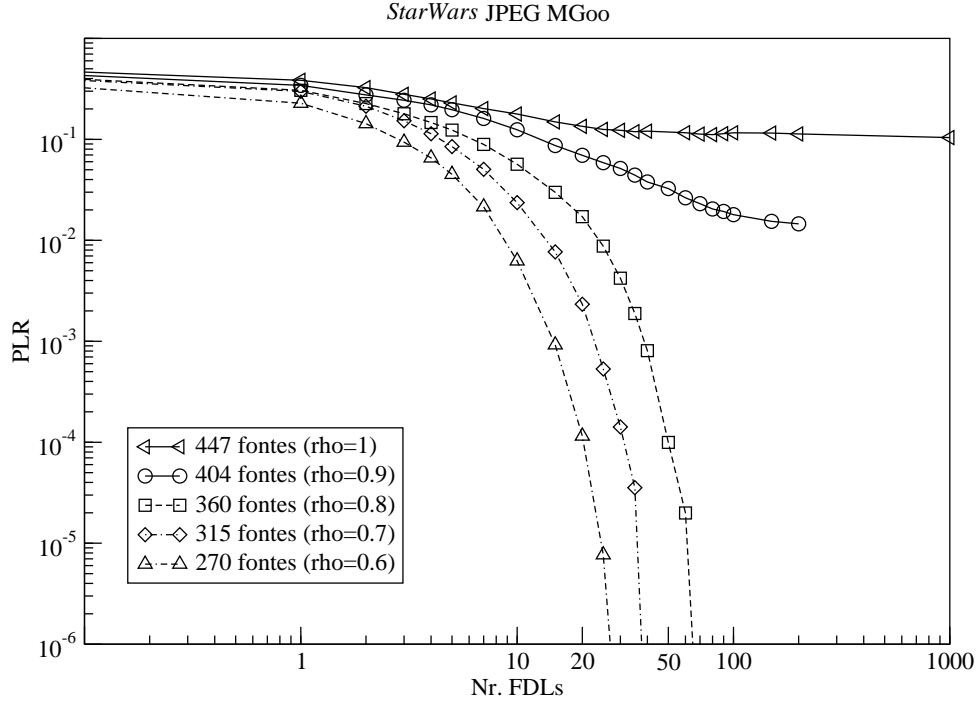


FIG. 4.7: PLR em função do número de FDLs para a seqüência *StarWars* (JPEG) $M/G/\infty$.

diferentes distribuições podem causar no desempenho dos comutadores ópticos. Além disso, podemos observar que obtivemos diferentes resultados com seqüências geradas pelo mesmo modelo $M/G/\infty$, considerando, por exemplo, as mesmas carga e PLR. Ou seja, com a seqüência *StarWars* (JPEG) gerada pelo modelo $M/G/\infty$, foram necessárias 50 FDLs para se obter uma PLR de 10^{-4} com $\rho = 0.8$, enquanto que com a seqüência *Silence* (H-263) também gerada pelo modelo $M/G/\infty$, foram necessárias 90 FDLs, sob as mesmas condições de PLR e $\rho = 0.8$. No entanto, para as seqüências *StarWars* (JPEG) e *Silence* (H-263) geradas pelo modelo fBm os resultados foram idênticos: foram necessárias 20 FDLs para se obter uma PLR de 10^{-4} com $\rho = 0.8$. Então, o que deve ser ressaltado é que além de diferentes modelos, é necessário que se utilize seqüências variadas para se obter uma avaliação mais precisa em termos de desempenho. Isso não é possível quando se utiliza apenas a carga ρ de um determinado modelo de tráfego. Os resultados obtidos com a seqüência *Race* (MPEG-1), a seguir, confirmam essa necessidade.

Conforme ilustrado na FIG. 4.11, com a seqüência *Race* (MPEG-1) $M/G/\infty$ e ρ de 0.8 (1120 fontes multiplexadas) foram necessárias 70 FDLs para se obter uma de PLR de 10^{-4} . As 70 FDLs equivaleriam a 2374.4 m de fibra óptica, introduzindo um retardo máximo de $11.87 \times 10^{-6} s$. Nessas mesmas condições de PLR, mas com ρ de 0.6 (831 fontes multiplexadas) foram necessárias apenas 20 FDLs. Entretanto, com a seqüência

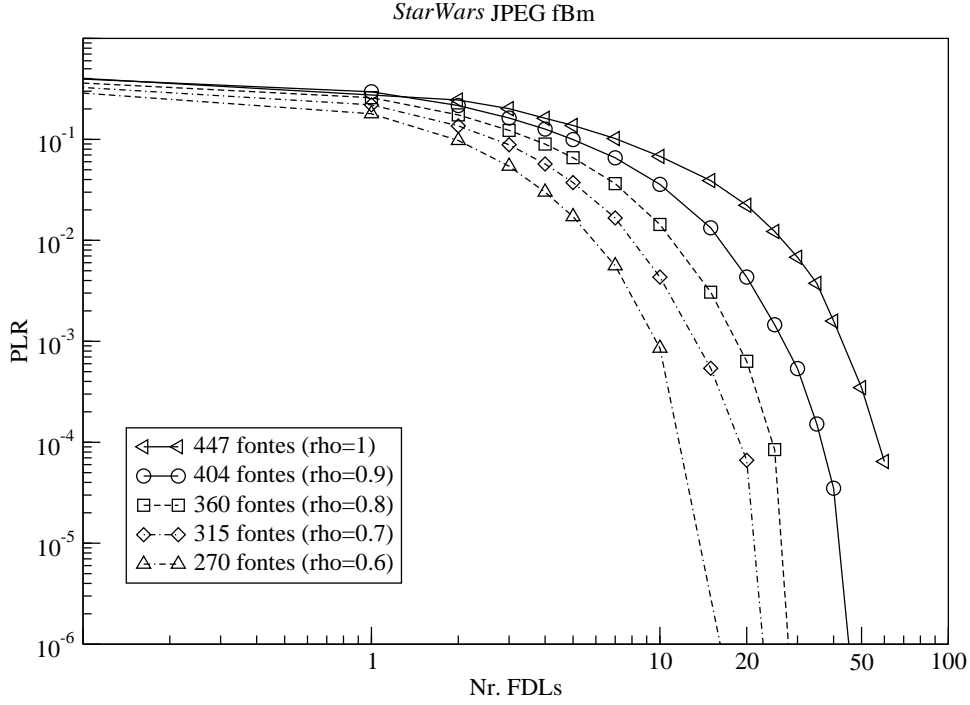


FIG. 4.8: PLR em função do número de FDLs para a seqüência *StarWars* (JPEG) fBm.

Race (MPEG-1) gerada pelo modelo fBm, foram necessárias apenas 35 FDLs para se conseguir multiplexar 1120 fontes ($\rho = 0.8$) e obter uma PLR de 10^{-4} , conforme ilustrado na FIG. 4.12. As 35 FDLs equivaleriam a 1187.20 m de fibra óptica, introduzindo um retardo de $5.94 \times 10^{-6} s$. Para um ρ de 0.6 (831 fontes multiplexadas), nesse mesmo valor de PLR, foram necessárias 15 FDLs. Isso resultaria em uma FDL construída com 508.8 m de fibra óptica. Em todos os resultados PLR x FDL, obtidos para as três seqüências, observamos o impacto dos diferentes modelos.

Para ficar mais evidente esta influência dos modelos, resumimos na TAB. 4.4 o resultado do número de FDLs necessárias para de obter uma PLR³⁵ de 10^{-4} com $\rho = 0.8$ para as seqüências, *StarWars* (JPEG), *Silence* e *Race* (MPEG-1) geradas pelos modelos $M/G/\infty$ e fBm.

Estes resultados permitem verificar que, para as seqüências *StarWars* e *Silence*, o número de FDLs necessárias quando se utiliza o modelo $M/G/\infty$ é maior que o dobro do necessário quando o comutador é alimentado com fontes geradas com o modelo fBm. Ou seja, o modelo $M/G/\infty$ tem um impacto muito maior sobre o desempenho do comutador óptico, em termos de PLR e retardo que o modelo fBm. Por isso, ele pode ser considerado como limite inferior de desempenho. Esta mesma influência do modelo de tráfego utilizado, pode ser observada nos resultados obtidos com a seqüência *Race*, quando com-

³⁵Essa PLR de 10^{-4} foi escolhida por questões de restrição de tempo de simulação.

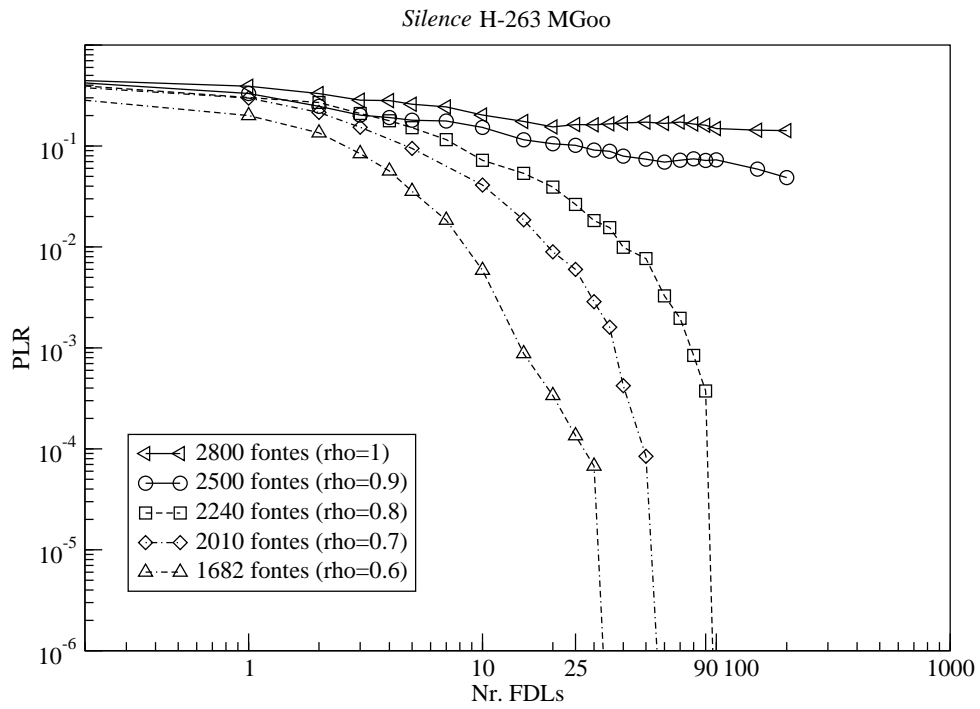


FIG. 4.9: PLR em função do número de FDLs para a seqüência *Silence H-263 M/G/∞*.

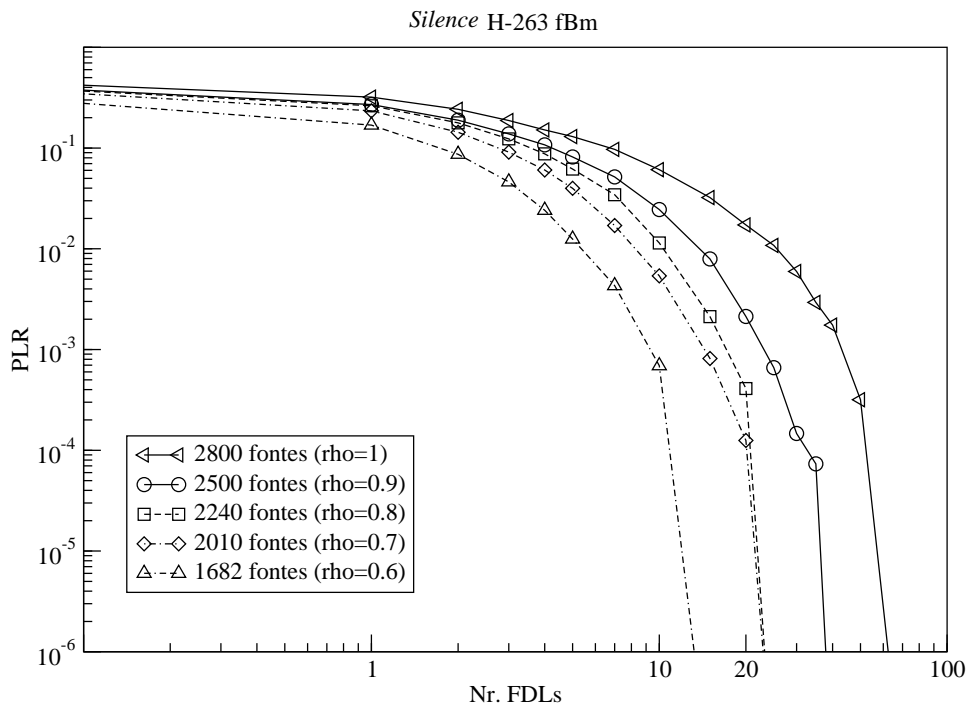


FIG. 4.10: PLR em função do número de FDLs para a seqüência *Silence H-263 fBm*.

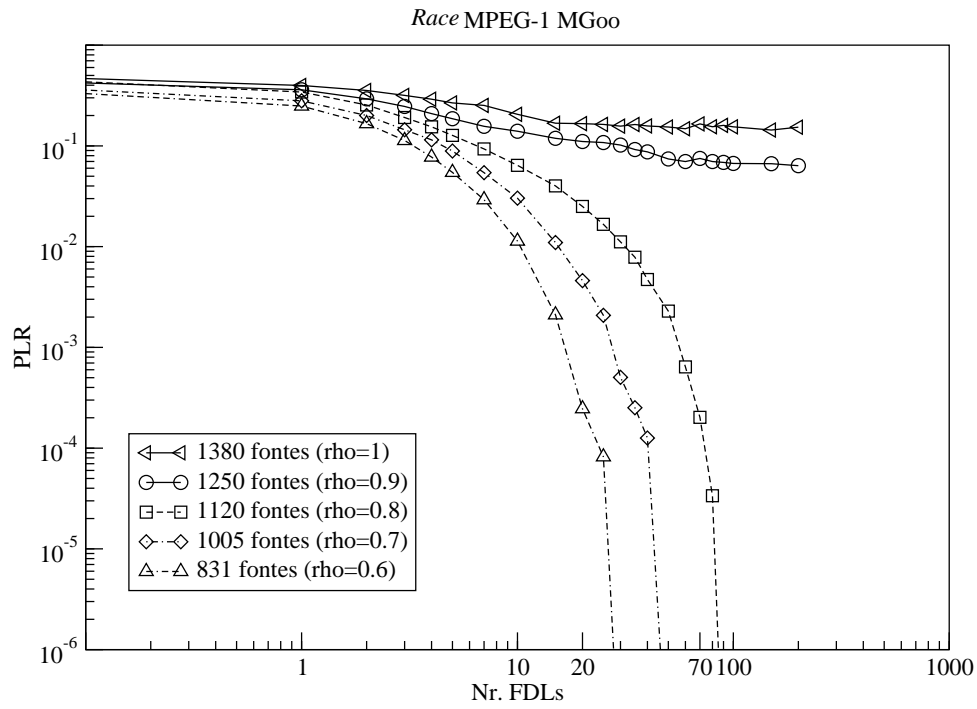


FIG. 4.11: PLR em função do número de FDLs para a seqüência *Race* (MPEG-1) $M/G/\infty$

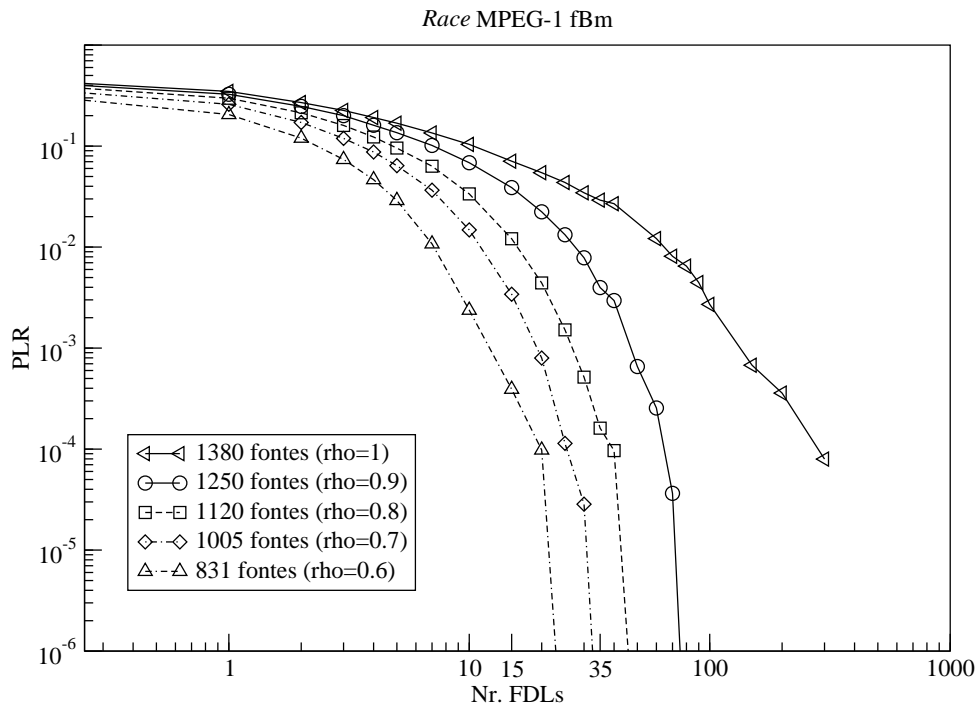


FIG. 4.12: PLR em função do número de FDLs para a seqüência *Race* (MPEG-1) fBm.

TAB. 4.4: 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).

Seqüência	Número de FDLs (u.b.=33.92 m)	
	$M/G/\infty$	fBm
<i>StarWars</i> (JPEG)	50	20
<i>Silence</i> H-263	90	20
<i>Race</i> (MPEG-1)	70	35

parados os dois modelos. Esse impacto deve-se a diferença entre a distribuição dos dois modelos de tráfego.

Finalmente, devemos ressaltar que apesar de ambos modelos de tráfego estarem expressando a característica LRD, a distribuição do tráfego é a principal causadora do impacto no desempenho dos comutadores ópticos. Logo, é fundamental sua consideração no desenvolvimento das futuras redes ópticas comutadas.

4.2.3 RESULTADOS DE PLR X FDL NO COMUTADOR ÓPTICO DE PACOTES COM VÁRIOS COMPRIMENTOS DE ONDA

A utilização de vários comprimentos de onda por porta de saída implica em introduzir conversores de comprimento de onda adicionais no comutador óptico. Com isso pode-se reduzir o número de FDLs necessárias para uma dada PLR, quando comparado com a utilização de apenas um comprimento de onda.

As curvas a seguir mostram a PLR versus o número de FDLs utilizadas no comutador óptico, com vários comprimentos de onda, para $\rho = 0.8$ e as seqüências *StarWars* (JPEG), *Silence* (H.263) e *Race* (MPEG-1), geradas com os modelos $M/G/\infty$ e fBm.

Conforme a FIG. 4.13, para se conseguir multiplexar 360 fontes *StarWars* (JPEG) $M/G/\infty$, sendo $\rho = 0.8$ e uma $PLR = 10^{-4}$, são necessárias 50 FDLs quando se utiliza 1 comprimento de onda. Com dois comprimentos de onda, no entanto, são necessárias apenas 5 FDLs. Quando se utiliza 4 comprimentos de onda, a introdução de 1 FDL é suficiente para alcançar a PLR de 10^{-4} . E, com 5 comprimentos de onda não é necessário utilizar FDLs, obtendo-se uma PLR menor que 10^{-4} . Com 8 comprimentos de onda, a $PLR \cong 0$. A FIG. 4.14 mostra o resultado da PLR versus número de FDLs, quando se alimenta o comutador óptico com 360 fontes ($\rho = 0.8$) *StarWars* (JPEG) geradas com o modelo fBm. Com a utilização de 1 comprimento de onda são necessárias 20 FDLs para se obter uma PLR de 10^{-4} , e com dois comprimentos de onda, são necessárias apenas 4 FDLs para se obter a mesma PLR. Quando se utiliza 4 comprimentos de onda, com uma

StarWars JPEG MGo - 360 fontes (rho=0.8)

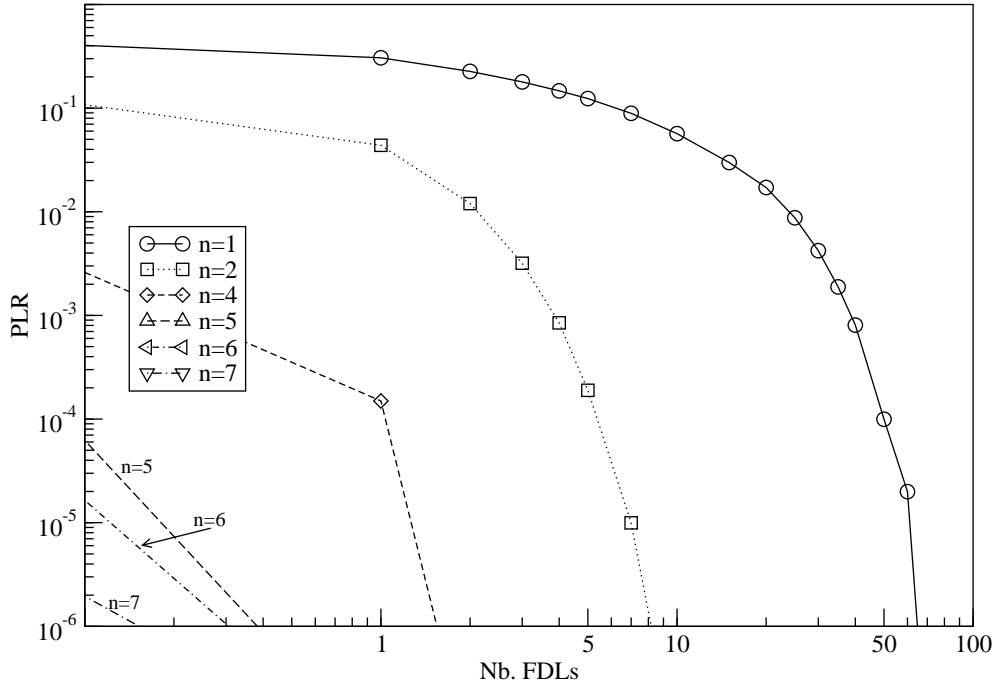


FIG. 4.13: PLR em função do número de FDLs necessárias para a seqüência *StarWars* (JPEG) $M/G/\infty$, com $\rho = 0.8$ e diversos comprimentos de onda (n).

FDL obtém-se a PLR de 10^{-4} . Para 5 comprimentos de onda não é necessário utilizar as FDLs, obtendo-se uma PLR menor que 10^{-4} . Neste caso, com 7 comprimentos de onda a $PLR \cong 0$. Nas próximas curvas, com outras seqüências geradas pelos modelos $M/G/\infty$ e fBm, veremos resultados semelhantes para vários comprimentos de ondas. Também poderemos observar que o aumento no número de comprimentos de onda acima de 7, não trará melhorias significativas no desempenho do comutador óptico.

Na FIG. 4.15 verificamos o resultado da PLR pelo número de FDLs, quando se alimenta o comutador óptico com 2240 fontes *Silence* (H-263) gerada com o modelo $M/G/\infty$. Quando se utiliza 1 comprimento de onda são necessárias 90 FDLs para se obter uma $PLR = 10^{-4}$. Com dois comprimentos de onda, são necessárias apenas 4 FDLs. E com 4 comprimentos de onda, 1 FDL já é suficiente para alcançar a PLR de 10^{-4} . Com 5 comprimentos de onda não é necessário utilizar as FDLs, obtendo-se uma PLR menor que 10^{-6} . Quando se utiliza mais de 6 comprimentos de onda, a $PLR \cong 0$.

Pela FIG. 4.16 podemos observar o resultado da PLR pelo número de FDLs, quando se alimenta o comutador óptico com 2240 fontes *Silence* (H-263) gerada com o modelo fBm. Quando se utiliza 1 comprimento de onda são necessárias 20 FDLs para se obter uma $PLR = 10^{-4}$. Com dois comprimentos de onda, são necessárias apenas 3 FDLs. E com 4 comprimentos de onda e uma FDL consegue-se uma PLR menor que 10^{-6} . Na

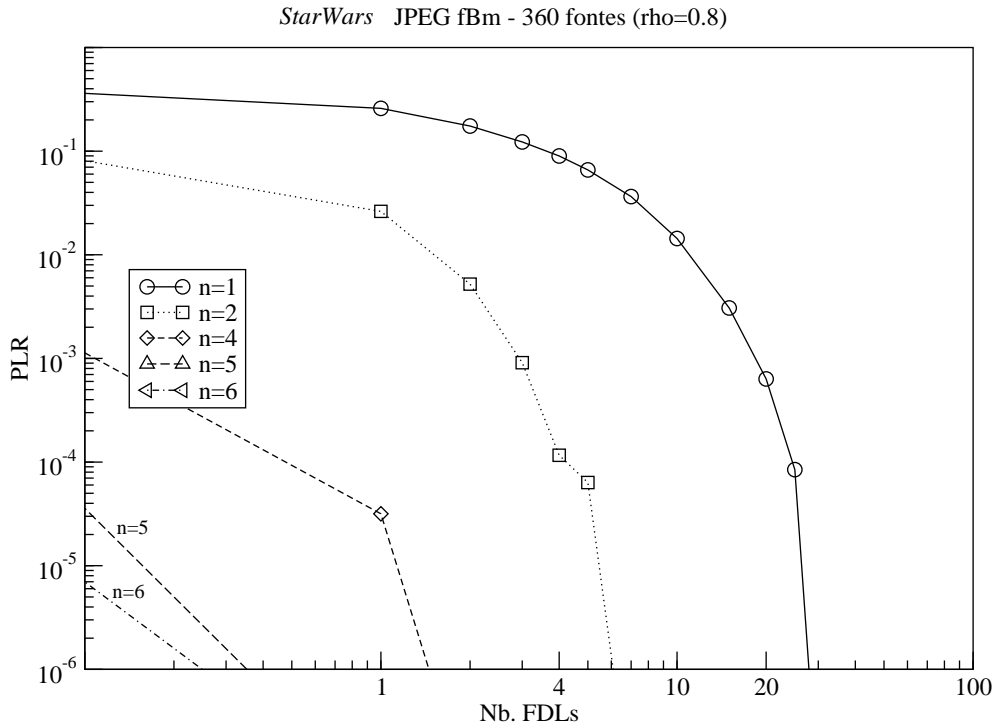


FIG. 4.14: PLR em função do número de FDLs necessárias para a seqüência *StarWars* (JPEG) fBm, com $\rho = 0.8$ e diversos comprimentos de onda (n).

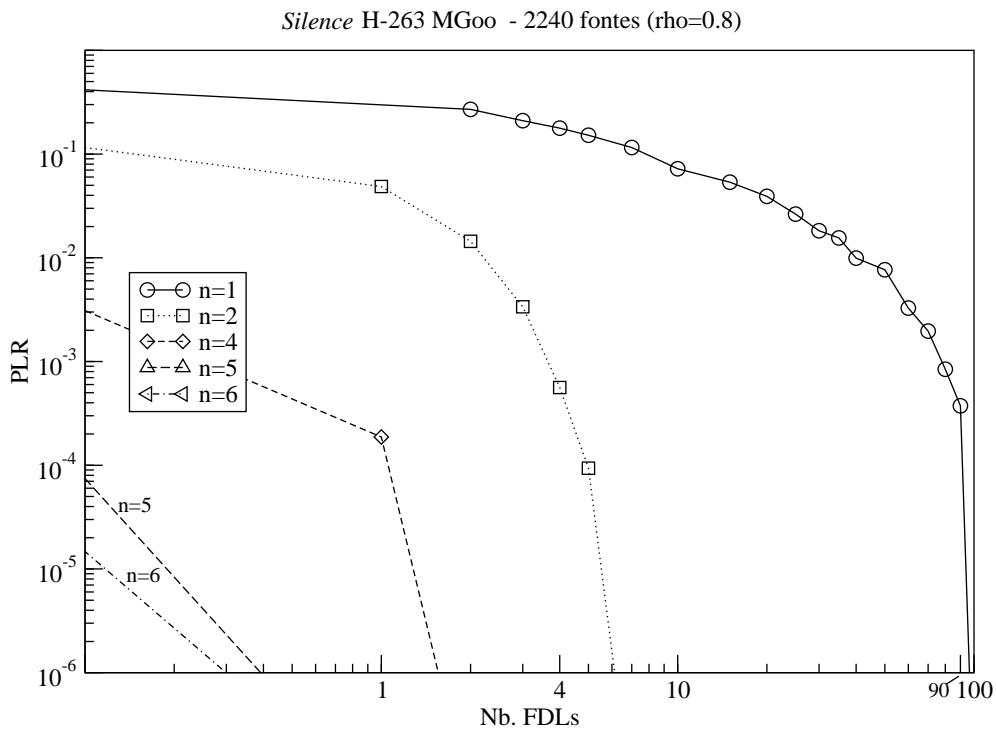


FIG. 4.15: PLR em função do número de FDLs necessárias para a seqüência *Silence* (H-263) $M/G/\infty$, com $\rho = 0.8$ e diversos comprimentos de onda (n).

Silence H-263 fBm - 2240 fontes ($\rho=0.8$)

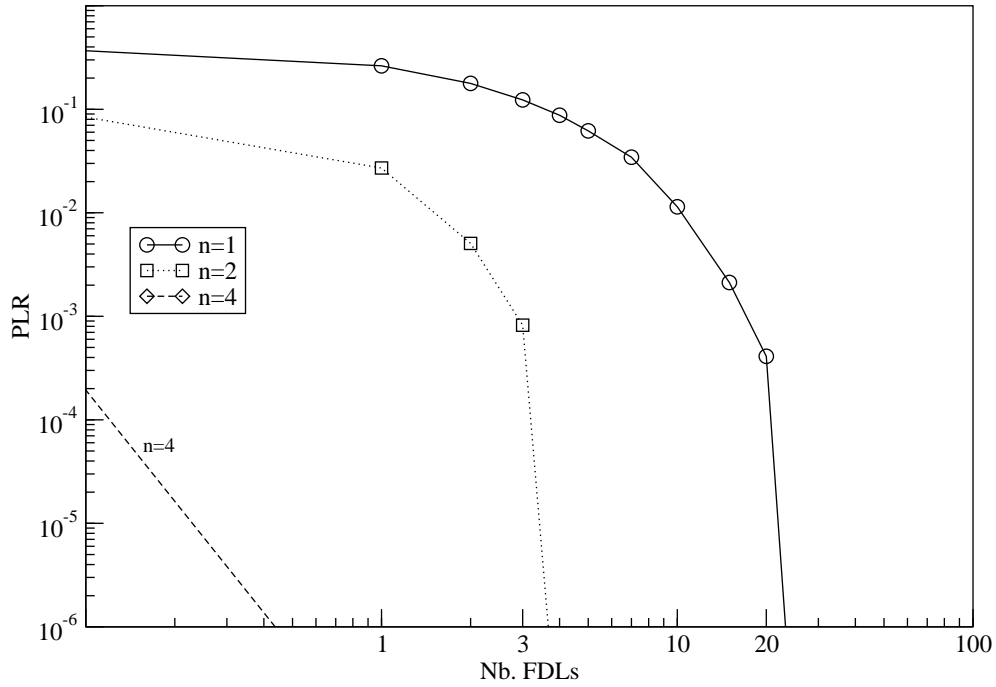


FIG. 4.16: PLR em função do número de FDLs necessárias para a seqüência *Silence* (H-263) fBm, com $\rho = 0.8$ e diversos comprimentos de onda (n).

realidade a utilização de 4 comprimentos de onda dispensa o uso das FDLs, obtendo-se uma PLR de 10^{-4} . Quando se utiliza mais de 4 comprimentos de onda, mesmo sem FDLs, a PLR é menor que 10^{-6} e não aparece no gráfico.

Conforme a FIG. 4.17, 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 FIG. 4.18 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 $PLR \cong 0$.

Em resumo, pelas curvas acima, pudemos verificar que a utilização de comprimentos de onda na resolução da contenção no comutador óptico de pacotes reduz consideravel-

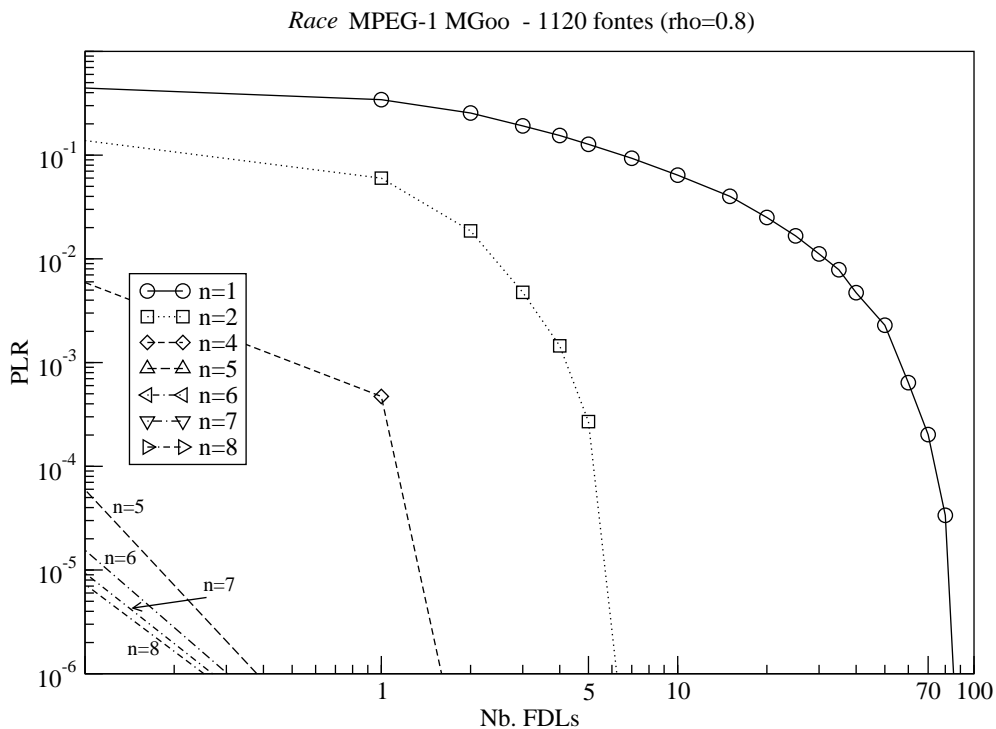


FIG. 4.17: PLR em função do número de FDLs necessárias para a seqüência *Race* (MPEG-1) $M/G/\infty$, com $\rho = 0.8$ e diversos comprimentos de onda (n).

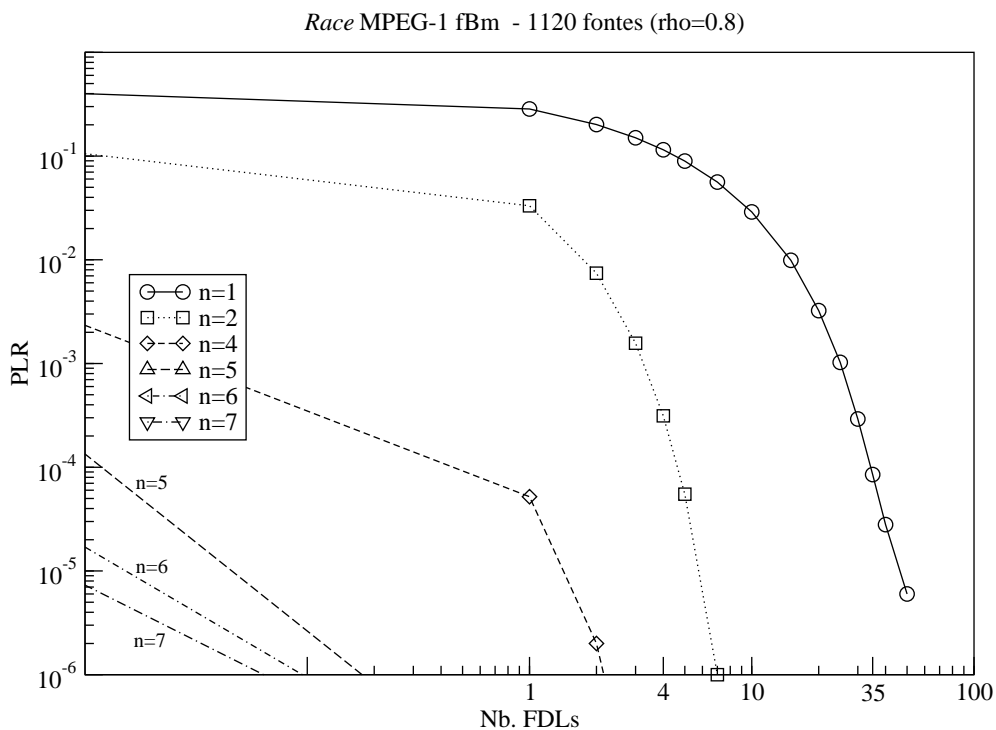


FIG. 4.18: PLR em função do número de FDLs necessárias para a seqüência *Race* (MPEG-1) $M/G/\infty$, com $\rho = 0.8$ e diversos comprimentos de onda (n).

mente 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.4.17, com a *Race* (MPEG-1) $M/G/\infty$, caso em que obteve-se o pior desempenho, entre todos os modelos e seqüências para $\rho = 0.8$. Em todos os outros casos com sete comprimentos de onda a PLR é menor que 10^{-5} , mesmo sem FDLs. Com a seqüência *Silence*, por exemplo, em ambos modelos, a PLR é menor que 10^{-6} quando se utiliza sete comprimentos de onda. Como o custo de conversores de comprimento de onda é alto, deve ser ressaltado é que a utilização destes em conjunto com as FDLs ainda é a melhor alternativa de arquitetura de *buffer* óptico.

4.2.4 RESULTADOS DE RETARDO MÁXIMO E MÉDIO, *JITTER*, PARÂMETRO H E NÚMERO DE PACOTES CIRCULANTES NAS FDLs NO COMUTADOR ÓPTICO DE PACOTES

A TAB. 4.5 ilustra o número de fontes multiplexadas, o ρ , 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 nas TAB. 4.3 e 4.2, observa-se que não sofreram alterações consideráveis no processo de comutação e armazenamento óptico.

TAB. 4.5: 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	ρ	<i>jitter</i> máx. (s)	retardo médio (s)	$\hat{H}(AV)$	$\hat{H}(R/S)$
<i>StarWars</i> (JPEG) - $M/G/\infty$	360	0.8	8.31×10^{-6}	1.41×10^{-6}	0.840	0.849
<i>Silence</i> (H.263) - $M/G/\infty$	2010	0.7	7.97×10^{-6}	1.10×10^{-6}	0.839	0.839
<i>Race</i> (MPEG-1) - $M/G/\infty$	1005	0.7	7.60×10^{-6}	8.90×10^{-7}	0.892	0.895
<i>StarWars</i> (JPEG) - fBm	447	1.0	8.31×10^{-6}	1.57×10^{-6}	0.841	0.831
<i>Silence</i> (H.263) - fBm	2800	1.0	7.46×10^{-6}	1.38×10^{-6}	0.821	0.822
<i>Race</i> (MPEG-1) - fBm	1250	0.9	8.47×10^{-6}	1.63×10^{-6}	0.862	0.869

A TAB. 4.6 ilustra o número de fontes multiplexadas, o ρ , 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 tabela 4.6 são muito inferiores aos encontrados na TAB.4.5. 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 nas TAB. 4.3 e 4.2, observamos que, também neste caso, não sofreram alterações relevantes no processo de comutação e armazenamento óptico. Além disso, os resultados de retardo médio e *jitter* máximo encontrados, atendem aos requisitos dos serviços de vídeo, conforme a TAB.4.18.

TAB. 4.6: 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	ρ	<i>jitter</i> máx (s)	retardo médio (s)	$\hat{H}(AV)$	$\hat{H}(R/S)$
<i>Star Wars</i> (JPEG) - $M/G/\infty$	404	0.9	8.48×10^{-7}	2.42×10^{-7}	0.840	0.841
<i>Silence</i> (H.263) - $M/G/\infty$	2500	0.9	8.48×10^{-7}	2.39×10^{-7}	0.832	0.824
<i>Race</i> (MPEG-1) - $M/G/\infty$	1120	0.8	8.48×10^{-7}	2.37×10^{-7}	0.883	0.884
<i>Star Wars</i> (JPEG) - fBm	447	1.0	2.28×10^{-7}	8.40×10^{-7}	0.841	0.831
<i>Silence</i> (H.263) - fBm	2800	1.0	8.48×10^{-7}	2.25×10^{-7}	0.841	0.831
<i>Race</i> (MPEG-1) - fBm	1380	1.0	8.48×10^{-7}	2.38×10^{-7}	0.868	0.876

Nesta seção apresentamos os principais resultados obtidos na simulação do comutador óptico de pacotes quando alimentado por tráfego de vídeo com dependência temporal. A influência do tráfego exibindo características LRD foi avaliada no desempenho do comutador óptico de pacotes, em termos de PLR. O impacto da utilização das FDLs foi analisado em termos de retardo, *jitter* e variação do parâmetro H . Também foi mostrado que a utilização de conversores de comprimento de onda reduz substancialmente o número de FDLs necessárias à implementação dos *buffers* ópticos.

4.3 RESULTADOS DA AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DO COMUTADOR ÓPTICO DE RAJADAS

Como mencionado anteriormente, o dimensionamento do *buffer* foi efetuado considerando o comutador óptico de rajadas quando alimentado por tráfego de vídeo com dependência temporal. Nas próximas seções vamos apresentar os resultados: (a) número máximo de fontes multiplexadas em um comprimento de onda, (b) dimensionamento do *buffer* do comutador OBS, (c) retardo máximo na montagem da rajada, (d) *jitter* mínimo, médio e máximo, e parâmetro H .

Norros descreveu em (NORROS, 1994) o comportamento de um *buffer* com taxa de serviço determinística (taxa de enlace óptico), quando alimentado por um agregado de conexões provenientes de fontes fBm e com grau de dependência temporal irrestrito ($0 < H < 1$). A fórmula ou modelagem proposta determina o número de fontes de vídeo que podem ser multiplexadas em um enlace óptico C , considerando-se uma dada PLR e tamanho de *buffer* K . Para a validação desta modelagem analítica foram realizadas simulações, e por questões de restrições de tempo, adotamos PLRs da ordem de 10^{-1} , 10^{-2} e 10^{-3} . A fórmula é definida por:

$$C = n_{max}m + (\kappa(H)\sqrt{-2\ln\epsilon})^{1/H}a^{1/(2H)}K^{-(1-H)/H}n_{max}m^{1/(2H)}. \quad (4.1)$$

onde:

n_{max} - número máximo de fontes multiplexadas em um enlace óptico, para uma dada PLR.

m - taxa média de chegada.

$a = Var[A(t)]/(mt)^{2H}$ - coeficiente de variância.

$H \in (\frac{1}{2}, 1)$ - parâmetro H .

$\kappa(H) = H^H(1-H)^{1-H}$.

C - taxa do enlace óptico.

K - tamanho do *buffer*.

ϵ - probabilidade de perda $P[Q > q]$ - A probabilidade que um *buffer* de tamanho Q se torne maior que um certo limite q .

Também avaliamos nesta seção o impacto causado no tráfego quando usamos um esquema de montagem de rajadas a partir de quadros de vídeo. A montagem de rajadas pode ser considerada como uma formatação do tráfego (*traffic smoothing*).

Os resultados encontrados foram comparados com requisitos de QoS para aplicações de serviços de vídeo. O impacto causado pelo tráfego com dependência no desempenho do comutador é avaliado comparando-se os resultados entre os dois modelos de tráfego utilizados, quanto ao número máximo de fontes que podem ser multiplexadas para um determinado número de FDLs e PLR.

Com as formulações apresentadas na Seção 3.2 para o modelo fBm, calculamos o número de fontes de vídeo que podem ser multiplexadas, dada uma determinada perda. Comparamos o resultado analítico com o resultado obtido de simulações, para os modelos de tráfego $M/G/\infty$ e fBm. Para avaliar com maior exatidão a influência da dependência de longo alcance no desempenho, utilizamos várias seqüências de vídeo com diferentes valores do parâmetro H .

4.3.1 CENÁRIO DA AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DO COMUTADOR ÓPTICO DE RAJADAS

Para avaliar o impacto do tráfego que exhibe dependência de longo alcance no desempenho do comutador óptico de rajadas descrito na Seção 2.5, utilizamos as mesmas seqüências de vídeo codificadas usadas na análise de desempenho do comutador OPS ³⁶.

A arquitetura para nossa análise foi apresentada na Seção 2.5, conforme a FIG.4.19. As rajadas são montadas em um *buffer* na borda da rede, em um esquema FtB, com os quadros oriundos dos trechos de seqüências. Durante a montagem é feito a reserva de comprimento de onda. Ao término da montagem, a rajada é convertida para o meio óptico através do laser sintonizável, quando lhe é atribuída o comprimento de onda reservado. Caso o comprimento de onda não esteja disponível, é computada uma perda. O objetivo inicial é calcular quantas fontes de vídeo podem ser multiplexadas a uma determinada taxa de enlace, PLR e tamanho de rajada. Na simulação validamos tais valores e verificamos o impacto do esquema de montagem de rajadas no *jitter* e no parâmetro H .

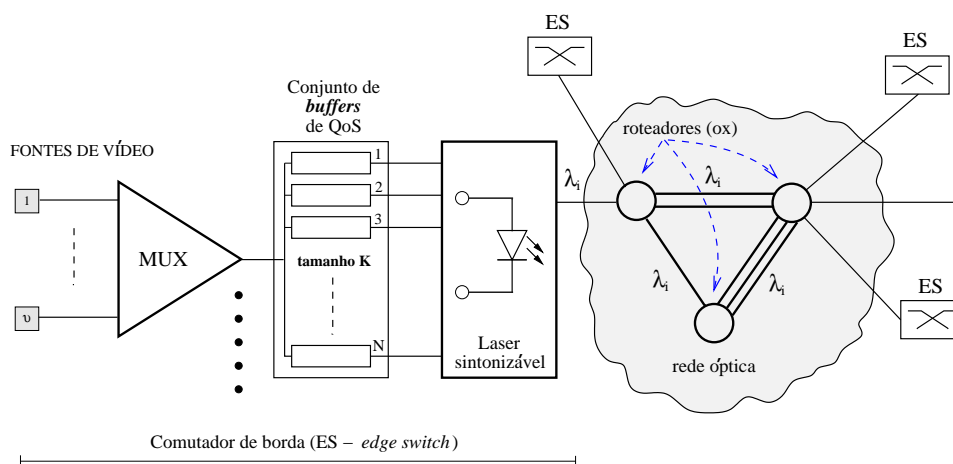


FIG. 4.19: Arquitetura genérica de rede OBS com comutador de borda

³⁶As TABs. 4.2 ($M/G/\infty$) e 4.3 (fBm) resumem os parâmetros das seqüências de vídeo utilizadas *Star Wars*, *Silence* e *Race* geradas pelos modelos $M/G/\infty$ e fBm.

Na análise de desempenho consideramos quatro tamanhos de *buffer* (K) de borda da rede, 2.12 Mbits, 4.24 Mbits, 42.4 Mbits e 424 Mbits, com taxas de enlace (C) de 2.5 Gbps e 10 Gbps ³⁷. Estas taxas de enlace são consideradas típicas em comunicações ópticas. Com esses valores calculamos os respectivos retardos de montagem de rajada (t_{ebp}), dado pela Eq. 3.22. Os resultados estão ilustrados na TAB.4.7.

TAB. 4.7: Retardo para montagem da rajada na borda.

Tamanho do <i>buffer</i> (K) em bits	$C = 10\text{Gbps}$	$C = 2.5\text{Gbps}$
2.12M	212 μs	848 μs
4.24M	424 μs	1.696 ms
42M	4.24 ms	16.8 ms
424M	42.4 ms	169.6 ms

Para os quatro tamanhos de *buffer* calculamos o número de fontes fBm que podem ser multiplexadas em um comprimento de onda, para uma determinada PLR. A perda acontece da seguinte maneira. Enquanto uma rajada pronta está sendo transmitida, a quantidade de bits provenientes das fontes de vídeo para a montagem da próxima rajada ultrapassa o tamanho do *buffer* K .

4.3.2 RESULTADOS DE $K \times$ PLR DO COMUTADOR ÓPTICO DE RAJADAS

As TABs. 4.8, 4.9 e 4.10 mostram os resultados analíticos com o número de fontes do modelo fBm que podem ser multiplexadas em um comprimento de onda para PLR de 10^{-3} , 10^{-2} e 10^{-1} , respectivamente. O modelo $M/G/\infty$ não possui formação analítica fechada e por isso, obtivemos apenas os resultados das simulações. Duas taxas de enlace óptico foram consideradas, 2.5Gbps e 10 Gbps.

As TABs. 4.11, 4.12 e 4.13 ilustram os resultados da simulação com os modelos $M/G/\infty$ e fBm, para o número de fontes multiplexadas. Os resultados apresentados na simulação para o número de fontes multiplexadas do modelo fBm estão condizentes com os resultados analíticos obtidos, para os todos tamanhos de *buffer*, independente da seqüência utilizada na análise. A FIG. 4.20 ilustra os resultados analíticos e de simulação obtidos com a seqüência *StarWars* fBm.

Também podemos notar a grande diferença entre os resultados do modelo fBm quando comparado aos resultados do modelo $M/G/\infty$. O número de fontes que podem

³⁷Esses tamanhos de *buffer* foram escolhidos por serem múltiplos de 424 bits, tamanho de célula ATM.

TAB. 4.8: Número máximo (analítico) de fontes de vídeo fBm multiplexadas em 10Gbps e 2.5Gbps e $PLR=10^{-3}$

K (em bits)	2.12M	4.24M	42M	424M
<i>StarWars</i>	1788-444	1789-445	1793-445	1795-448
<i>Silence</i>	11184-2790	11188-2792	11199-2796	11205-2799
<i>Race</i>	5510-1371	5513-1373	5521-1376	5526-1379

TAB. 4.9: Número máximo (analítico) de fontes de vídeo fBm multiplexadas em 10Gbps e 2.5Gbps e $PLR=10^{-2}$

K (em bits)	2.12M	4.24M	42M	424M
<i>StarWars</i>	1789-445	1790-446	1793-447	1795-448
<i>Silence</i>	11188-2792	11191-2793	11200-2797	11206-2800
<i>Race</i>	5514-1373	5516-1374	5523-1377	5528-1379

TAB. 4.10: Número máximo (analítico) de fontes de vídeo fBm multiplexadas em 10Gbps e 2.5Gbps e $PLR=10^{-1}$

K (em bits)	2.12M	4.24M	42M	424M
<i>StarWars</i>	1791-446	1792-446	1794-447	1796-448
<i>Silence</i>	11193-2794	11196-2795	11203-2798	11208-2800
<i>Race</i>	5518-1375	5520-1376	5526-1378	5530-1380

ser multiplexadas, para uma mesma PLR, com o modelo de tráfego de vídeo $M/G/\infty$ foi menor que o fBm, implicando em um menor ρ . Ou seja, o modelo $M/G/\infty$ causou um impacto maior no desempenho do comutador que o modelo fBm.

Para verificar se o parâmetro H das seqüências usadas na simulação foi alterado pelo processo de montagem das rajadas, fizemos a estimação após o comutador. Nas TABs. 4.14 e 4.15 vemos os resultados obtidos do parâmetro H para taxas de enlace de 2.5 Gbps e 10 Gbps, respectivamente, e comparado com os valores originais, notamos que não sofreram alterações consideráveis, para quaisquer dos tamanhos de *buffer* utilizados na montagem das rajadas.

O *jitter* introduzido no processo também foi avaliado, medindo-se após a passagem pelo comutador óptico. Os valores de *jitter* ficaram muito próximos, quando comparados entre seqüências e modelos diferentes, para um mesmo tamanho de *buffer*. Assim, a TAB. 4.16 mostra os resultados de *jitter* mínimo, médio e máximo obtidos com a seqüência *StarWars* gerada pelo modelo $M/G/\infty$, para taxa de 2.5 Gbps, e a TAB. 4.17 para taxa de 10 Gbps.

Como esperado, o *jitter* aumenta com o tamanho do *buffer*. Como o *jitter* deve aten-

TAB. 4.11: Número máximo (simulado) de fontes de vídeo $M/G/\infty$ e fBm multiplexadas em 10Gbps e 2.5Gbps e $PLR=10^{-3}$

K (em bits)	2.12M	4.24M	42M	424M
$StarWars_{M/G/\infty}$	1511-383	1512-384	1513-327	1515-370
$StarWars_{fBm}$	1783-448	1790-448	1798-449	1799-449
$Silence_{M/G/\infty}$	10180-2335	10350-2350	10400-2370	10400-2383
$Silence_{fBm}$	10970-2788	11177-2796	11260-2810	11262-2813
$Race_{M/G/\infty}$	4742-1055	4780-1058	4811-1083	4812-1065
$Race_{fBm}$	5493-1374	5508-1382	5544-1385	5549-1386

TAB. 4.12: Número máximo (simulado) de fontes de vídeo $M/G/\infty$ e fBm multiplexadas em 10Gbps e 2.5Gbps e $PLR=10^{-2}$

K (em bits)	2.12M	4.24M	42M	424M
$StarWars_{M/G/\infty}$	1512-385	1515-388	1518-336	1520-378
$StarWars_{fBm}$	1789-449	1794-449	1799-449	1800-449
$Silence_{M/G/\infty}$	10250-2350	10400-2360	10403-2390	10408-2410
$Silence_{fBm}$	11025-2793	11206-2803	11265-2813	11270-2815
$Race_{M/G/\infty}$	4755-1160	4785-1165	4814-1093	4814-1090
$Race_{fBm}$	5505-1378	5522-1383	5549-1386	5551-1387

TAB. 4.13: Número máximo (simulado) de fontes de vídeo $M/G/\infty$ e fBm multiplexadas em 10Gbps e 2.5Gbps e $PLR=10^{-1}$

K (em bits)	2.12M	4.24M	42M	424M
$StarWars_{M/G/\infty}$	1538-398	1540-405	1545-381	1550-386
$StarWars_{fBm}$	1796-450	1797-450	1800-450	1801-450
$Silence_{M/G/\infty}$	10400-2370	10403-2380	10405-2590	10410-2590
$Silence_{fBm}$	11135-2803	11240-2810	11275-2817	11280-2818
$Race_{M/G/\infty}$	4780-1170	4800-1175	4819-1125	4820-1223
$Race_{fBm}$	5526-1383	5539-1386	5553-1388	5554-1388

der os requisitos exigidos por aplicações de serviços de vídeo, há um limite de tamanho de *buffer* que pode ser utilizado. Os valores de *jitter* obtidos foram comparados com os requisitos que são reproduzidos na TAB. 4.18, obtidos de (ONVURAL, 1995). Notamos que na taxa de 2.5 Gbps os serviços de Vídeo NTSC MPEG 1.5 Mbps e Voz MPEG 256 Kbps só podem ser utilizados com buffers menores que 42Mbits. Nessa taxa o serviço de Vídeo HDTV 20 Mbps possui uma restrição ainda maior, só podendo ser utilizado com *buffer* de 2.12Mbits.

Para a taxa de 10 Gbps, ainda no critério *jitter*, o serviço de Vídeo NTSC MPEG 1.5 Mbps só pode ser utilizado com buffers menores que 424Mbits e o Vídeo HDTV 20 Mbps com buffers menores que 42Mbits.

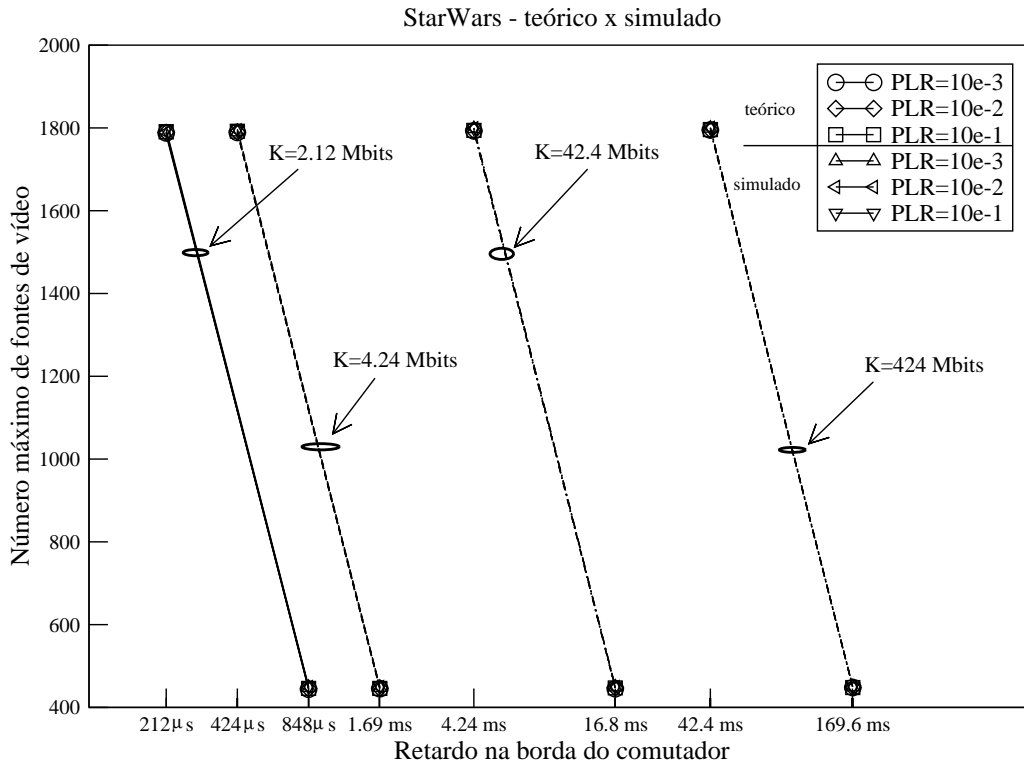


FIG. 4.20: Resultados analítico e de simulação do desempenho do comutador óptico de rajadas com a seqüência *StarWars* - fBm.

Quanto ao retardo, que é introduzido na montagem das rajadas conforme a TAB. 4.7, podemos verificar que para a taxa de 2.5 Gbps os serviços de Vídeo NTSC MPEG 1.5 Mbps e Voz MPEG 256 Kbps só podem ser utilizados com buffers menores que 42Mbits. Nessa taxa, o serviço de Voz comprimida 16 Kbps só pode ser utilizado com buffers menores que 424Mbits e o serviço de Vídeo HDTV 20 Mbps não pode ser utilizado nessa taxa, para quaisquer dos tamanhos de *buffer* utilizados na análise. Na taxa de 10 Gbps, o retardo na montagem das rajadas é menor e o serviço de Vídeo HDTV 20 Mbps pode ser utilizado com buffers menores que 42Mbits. Nessa taxa os serviços de Vídeo NTSC MPEG 1.5 Mbps, Voz comprimida 16 Kbps e Voz MPEG 256 Kbps podem ser utilizados com buffers menores que 424Mbits. A TAB. 4.19 resume as restrições de retardo e *jitter* na determinação de tamanho de *buffer*.

Resumindo, apresentamos os principais resultados obtidos na análise de desempenho do comutador óptico de rajadas quando alimentado por tráfego de vídeo com dependência temporal. Analisamos o impacto, em termos de PLR, causado no desempenho da comutador óptico pelo tráfego que exibe dependência de longo alcance, usando os modelos de tráfego $M/G/\infty$ e fBm. Analisamos o efeito causado no tráfego pela montagem de rajadas no comutador óptico, no que se refere ao retardo e *jitter*. Verificamos também

TAB. 4.14: Parâmetro (H) das seqüências de vídeo após a montagem da rajada na taxa de 2.5 Gbps.

K (em bits)	original	2.12M	4.24M	42M	424M
seqüência	$\hat{H}(AV)$				
<i>StarWars</i> (JPEG) $M/G/\infty$	0.831	0.833	0.822	0.837	0.843
<i>StarWars</i> (JPEG) fBm	0.831	0.841	0.835	0.830	0.827
<i>Silence</i> (H.263) $M/G/\infty$	0.801	0.818	0.797	0.801	0.806
<i>Silence</i> (H.263) fBm	0.822	0.817	0.821	0.822	0.826
<i>Race</i> (MPEG-1) $M/G/\infty$	0.875	0.871	0.876	0.885	0.861
<i>Race</i> (MPEG-1) fBm	0.870	0.862	0.852	0.870	0.859

TAB. 4.15: Parâmetro (H) das seqüências de vídeo após a montagem da rajada na taxa de 10 Gbps.

K (em bits)	original	2.12M	4.24M	42M	424M
seqüência	$\hat{H}(AV)$				
<i>StarWars</i> (JPEG) $M/G/\infty$	0.831	0.811	0.872	0.833	0.829
<i>StarWars</i> (JPEG) fBm	0.831	0.859	0.896	0.830	0.850
<i>Silence</i> (H.263) $M/G/\infty$	0.801	0.810	0.798	0.804	0.827
<i>Silence</i> (H.263) fBm	0.822	0.837	0.860	0.820	0.830
<i>Race</i> (MPEG-1) $M/G/\infty$	0.875	0.877	0.865	0.868	0.863
<i>Race</i> (MPEG-1) fBm	0.870	0.868	0.871	0.873	0.865

as restrições na utilização de determinados serviços de vídeo com o comutador óptico de rajadas.

4.4 ANÁLISE COMPARATIVA DE DESEMPENHO DO COMUTADOR ÓPTICO DE PACOTES E DE RAJADAS

A principal vantagem da comutação óptica de pacotes é melhorar a utilização da banda disponível no meio óptico. O compartilhamento estatístico do meio, onde muitas fontes de tráfego utilizam o meio óptico pode ser realizado simultaneamente, independente de origem e destino de cada uma, aumentando também a flexibilidade na rede WDM (HUNTER, 2000). A comutação óptica de pacotes possibilita a alocação de canais WDM sob demanda, com fina granularidade (PAPADIMITRIOU, 2003). Além disso, a comutação óptica de pacotes oferece altas taxas de transmissão com transparência ao formato e taxa (DIXIT, 2000), adequado para suporte multitráfego. Os pacotes não necessariamente têm que ter o mesmo tamanho e a taxa do campo de informação pode ser variável.

TAB. 4.16: *Jitter* introduzido no tráfego de vídeo após a montagem da rajada para a seqüência *StarWars* ($M/G/\infty$) na taxa de 2.5 Gbps.

K	<i>jitter</i> (s)		
	mínimo	médio	máximo
2.12Mbits	-6.7×10^{-5}	-5.3×10^{-9}	7.6×10^{-4}
4.24Mbits	-7.0×10^{-5}	-2.0×10^{-8}	2.0×10^{-3}
42Mbits	-1.1×10^{-4}	-2.1×10^{-6}	1.0×10^{-2}
424Mbits	-4.5×10^{-4}	-1.1×10^{-5}	3.8×10^{-2}

TAB. 4.17: *Jitter* introduzido no tráfego de vídeo após a montagem da rajada para a seqüência *StarWars* ($M/G/\infty$), na taxa de 10 Gbps.

K	<i>jitter</i> (s)		
	mínimo	médio	máximo
2.12Mbits	-7.0×10^{-5}	-2.0×10^{-10}	1.0×10^{-4}
4.24Mbits	-7.0×10^{-5}	-3.5×10^{-10}	3.0×10^{-4}
42Mbits	-2.0×10^{-4}	-6.8×10^{-8}	3.6×10^{-3}
424Mbits	-3.5×10^{-4}	-2.1×10^{-7}	8.8×10^{-3}

TAB. 4.18: Requisitos de QoS para aplicações de vídeo (ONVURAL, 1995).

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

A comutação óptica de rajadas não é tão flexível quanto a de pacotes. Os pacotes que formam as rajadas na borda da rede devem normalmente ter em comum o destino. Se os pacotes tiverem apenas alguns segmentos da rede em comum, já inviabiliza o processo. Essa condição é muito restritiva, levando a um possível desperdício de banda, uma vez que há um tempo limite na montagem da rajada. Ou seja, se não há pacotes suficientes para completar a rajada dentro de um determinado período, ela será enviada sem estar completamente cheia. Além disso, a perda de uma rajada por contenção de congestionamento pode causar sérios impactos aos requisitos de QoS das conexões.

Pelos resultados apresentados, para se obter um desempenho, em termos de PLR, no comutador óptico de pacotes semelhante ao comutador óptico de rajadas, para rajadas de 424 Mbits, com a seqüência *StarWars* e taxa de enlace de 2.5 Gbps, são necessárias 50 FDLs utilizando-se 1 comprimento de onda, para ambos modelos de tráfego. Quando se trabalha com 2 comprimentos de onda, são necessárias 7 FDLs, para seqüências do modelo $M/G/\infty$, e 5 FDLs para seqüências do modelo fBm.

TAB. 4.19: Resumo das restrições de retardo e *jitter* na determinação de tamanho de *buffer* para aplicações de áudio e vídeo (ONVURAL, 1995).

K (em bits)	2.12M		4.24M		42M		424M	
Aplicação - C (Gbps)	2.5	10	2.5	10	2.5	10	2.5	10
Vídeo conferência - 64 K	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Vídeo NTSC MPEG 1.5 Mbps	✓	✓	✓	✓	JR	✓	JR	JR
Vídeo HDTV 20 Mbps	R	✓	JR	✓	JR	JR	JR	JR
Voz comprimida 16 Kbps	✓	✓	✓	✓	✓	✓	JR	JR
Voz MPEG 256 Kbps	✓	✓	✓	✓	JR	✓	JR	R

✓ - Sem restrição.

J - Restrição no *jitter* máximo.

R - Restrição no retardo máximo.

JR- Restrição no *jitter* máximo e retardo máximo.

Como visto, alguns tipos de serviços não toleram o retardo existente na montagem da rajada. E essa montagem pode trazer alterações no tráfego original, introduzindo *jitter*. Nesse caso, talvez seja necessário usar um mecanismo para recuperar o *jitter*.

4.5 RESUMO

Neste capítulo apresentamos os principais resultados obtidos na análise de desempenho dos comutadores ópticos de pacotes e de rajadas quando alimentado por tráfego de vídeo com dependência temporal. Analisamos o impacto, em termos de PLR, causado no desempenho do comutador óptico pelo tráfego que exhibe dependência de longo alcance, usando os modelos de tráfego $M/G/\infty$ e fBm. Analisamos o impacto causado no tráfego pelas FDLs, no comutador óptico de pacotes, e na montagem de rajadas, no comutador óptico de rajadas, no que se refere ao retardo e ao *jitter*, implicando em restrições na utilização de determinados serviços de vídeo.

5 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

5.1 PRINCIPAIS CONCLUSÕES

Nesta dissertação, examinamos o desempenho de comutadores ópticos de pacotes e rajadas, suportando tráfego de vídeo com dependência temporal. As principais medidas de desempenho determinadas para as arquiteturas OPS e OBS foram a PLR, o retardo (máximo e médio) e a variação do retardo (*jitter*). Para a obtenção de uma avaliação de desempenho mais precisa, foram utilizados os processos fBm e $M/G/\infty$ como modelos de tráfego e consideradas diferentes seqüências de vídeo. A validação destes modelos foi realizada quanto a sua representação do grau de dependência temporal (parâmetro H), FAC e distribuição de chegadas.

As arquiteturas dos comutadores OPS e OBS foram dimensionadas segundo o número de FDLs e/ou TWCs (OPS) e tamanho de rajada (OBS) de forma a obter o melhor desempenho da rede WDM. Para a arquitetura OBS foi proposto um método de montagem de rajada (FtB) para a garantia dos requisitos de QoS do tráfego de vídeo.

Nas arquiteturas de comutadores ópticos de pacotes pudemos ver as diferentes formas de resolver o problema da contenção. Neste estudo, as restrições tecnológicas foram apresentadas assim como alternativas na implementação dos *buffers* dos comutadores ópticos.

Os resultados de retardo e *jitter* obtidos para ambas arquiteturas, estão compatíveis com os requisitos de QoS das aplicações de vídeo. O tamanho das FDLs, assim como das rajadas, não provocou alterações no grau de dependência temporal (LRD) das fontes de tráfego. Também, não foi verificado impacto significativo da característica LRD nos tamanhos dos *buffers* ópticos.

O modelo $M/G/\infty$ se confirmou como o limitante inferior de desempenho causando um impacto maior no desempenho dos comutadores quando comparado ao modelo fBm (limitante superior). Em geral, os resultados demonstraram que a distribuição do tráfego das conexões pode causar um grande impacto no dimensionamento dos comutadores ópticos. Logo, esta distribuição deve ser considerada no desenvolvimento dos futuros comutadores ópticos assim como no desempenho das redes ópticas comutadas com tecnologia WDM. A seguir, são apresentadas algumas sugestões para trabalhos futuros.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Avaliação do desempenho dos comutadores ópticos OPS e OBS considerando modelos multifractais (RIEDI, 2000). Ou seja, modelos com representação de distintos graus de dependência temporal para uma mesma conexão.
- Avaliação do desempenho da rede WDM relacionando parâmetros do meio físico óptico com parâmetros de desempenho das comunicações tais como BER (*Bit Error Rate*) com PLR.
- Estudo do desempenho de outras arquiteturas (*feed-forward*) de comutação óptica considerando os modelos $M/G/\infty$ e fBm.
- Estudo e proposta de métodos de medição de parâmetros de tráfego (m, σ, H) e desempenho (PLR) no meio óptico.
- Avaliação do desempenho dos comutadores ópticos OPS considerando pacotes de tamanho variável e multiplexação WDM assíncrona (*unslotted*).

5.3 COMENTÁRIOS FINAIS

Até o momento, os principais estudos envolvendo os comutadores OBS e OPS, consideravam apenas o tráfego IP (*Internet Protocol*) (SIRÉN, 2002), (QIAO, 2000) e (DOLZER, 2001) e protocolos de reserva de comprimentos de onda para OBS (DÜSER, 2002) e (YOO, 1997). Nesta dissertação, um cenário mais crítico para a avaliação do desempenho dos comutadores OPS e OBS foi considerado ao adotar-se o suporte ao tráfego de vídeo com dependência temporal. Assim, foi possível dimensionar melhores arquiteturas OBS e OPS de forma a resolver problemas de contenção em redes ópticas WDM.

No entanto, muitas pesquisas ainda são necessárias para se determinar a melhor arquitetura de comutação óptica. A dependência tecnológica dos componentes ópticos para desenvolvimento de *buffers* ópticos ainda é a maior limitação para a implantação, em um futuro próximo, de redes ópticas comutadas com tecnologia WDM.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABRY, P. e VEITCH, D. **Wavelet analysis of long-range dependent traffic.** *IEEE Transactions on Information Theory*, 44, n. 1, p. 2–15, January 1998.
- AGARWAL, A., WANG, L, SU, Y. e KUMAR, P. **All-optical erasable storage buffer based on parametric nonlinearity in fiber.** *presented at the 2001 Optical Fiber Communications Conference (OFC'01)*, March 2001.
- AGRAWAL, G. P. **Fiber Optic Communication Systems.** John Wiley & Sons, Inc., 2nd Edition, 1997.
- ANDERSEN, A.T. e NIELSEN, B.F. **A Markovian Approach fo Modeling Packet Traffic with Long-Range Dependence.** *IEEE JSAC*, 16, n. 5, p. 719–731, June 1998.
- BARNSLEY, M., ET AL. **The Science of Fractal Images.** Springer-Verlag New York Inc., USA, 1988.
- BENDELLI, G., BURZIO, M., GAMBINI, P. e PULEO, M. **Performance assessment of a photonic ATM switch based on a wavelength-controlled fiber loop buffer.** *Proceedings of the OFC*, p. 106–107, 1996.
- BERAN, J. **Statistics for Long-Memory Processes.** Chapman & Hall/CRC, 2nd Edition, 1998.
- BERAN, J., SHERMAN, R., TAQQU, M.S. e WILLINGER, W. **Long-Range Dependence in Variable-Bit-Rate Video Traffic.** *IEEE/ACM Transactions on Communications*, 43, n. 2/3/4, p. 1566–1579, February/March/April 1995.
- BJORNSTAD, S., ET AL. **Optical burst and packet switching: Node and network design, contention resolution and Quality of Service.** *Proceedings of the 7th International Conference on Telecommunications (ConTEL2003)*, June 2003.
- BOX, G. E. P. e JENKINS, G. M. **Time series analysis: forecasting and control.** Holden Day, San Francisco, 1970.
- BOYER, P. e TRANCHIER, D. **A Reservation Principle with Aplications to the ATM Traffic Control.** *Computer Network and ISDN Systems Journal*, 24 p. 321–334, 1992.
- CHIARONI, D., ET AL. **KEOPS - KEys to Optical Packet Switching.** *ACTS Project AC043. Final Report.*, December 1998.
- CISCO. **Introduction to DWDM fo Metropolitan Networks.** Technical Report OL-0884-01, Cisco Systems, Inc., 2000. URL http://www.cisco.com/en/US/products/hw/optical/ps1923/products_technical_reference_book09186a00800ea729.html.

- COELHO, R. e DECREUSEFOND, L. **Statistical Performance of TV/HDTV Traffic over Broadband Digital Networks.** *Proceedings of the IEEE GLOBECOM*, November 1998.
- CROVELLA, MARK E. e BESTAVROS, AZER. **Self similarity in Word Wide Web Traffic: Evidence and Possible Causes.** *Proceedings of the the ACM SIGMETRICS Intl. Conference on Measurement and modeling of computer systems*, May 1996.
- DANIELSEN, S., ET AL. **WDM Packet Switch Architectures and Analysis of the Influence of Tuneable Wavelength Converters on the Performance.** *Journal of Lightwave Technology*, 15, n. 2, p. 219–227, February 1997.
- DANIELSEN, S. L., HANSEN, P.B. e STUBKJAER, K.E. **Wavelength Conversion in Optical Packet Switching.** *Journal of Lightwave Technology*, 16, n. 12, p. 2095–2108, December 1998.
- DAUBECHIES, I. *Ten Lectures on Wavelets.* SIAM, Pensilvania, 1992.
- DIXIT, S., YAO, S. e MUKHERJEE, B. **Advances in Photonic Packet Switching: An Overview.** *IEEE Communications Magazine*, p. 84–94, February 2000.
- DIXIT, S. e YE, Y. **Streamlining the Internet-Fiber Connection.** *IEEE Spectrum*, April 2001.
- DOLZER, K. e GAUGER, C. **On Burst Assembly in Optical Burst Switching Networks-A Performance Evaluation of Just-Enough-Time.** *Proceedings of the 17th International Teletraffic Congress*, p. 149–160, December 2001.
- DÜSER, M. e BAYVEL, P. **Analysis of a Dynamically Wavelength-Routed Optical Burst Switched Network Architecture.** *Journal of Lightwave Technology*, 20, n. 4, p. 574–585, April 2002.
- ERAMO, V. e LISTANTI, M. **Packet loss in a bufferless optical WDM switch employing shared tunable wavelength converters.** *Journal of Lightwave Technology*, 18 p. 1818–1833, December 2000.
- GABRIAGUES, J.M. e JACOB, J.B. **OASIS: A high-speed photonic ATM switch-Results and perspectives.** *Proceedings of the 15th.Int. Switching Symp.*, , n. C8.4, p. 457–461, April 1995.
- GAMBINI, P., ET AL. **Transparent Optical Packet Switching: Network Architecture and Demonstrators in the KEOPS Project.** *IEEE JSAC*, 16, n. 7, p. 1245–1259, September 1998.
- GARRETT, M. W. e WILLINGER, W. **Analysis, Modeling and Generation of Self-Similar VBR Video Traffic.** *Proceedings of ACM SIGCOMM'94*, September 1994.
- GROSSGLAUSER, M. e BOLOT, J. **On the relevance of long-range dependence in network traffic.** *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 7, n. 5, p. 629–640, 1999. URL citeseer.nj.nec.com/grossglauser96relevance.html.

- GUILLEMOT, C., ET AL. **Transparent Optical Packet Switching: The European ACTS KEOPS Project Approach.** *Journal of Lightwave Technology*, 16, n. 12, p. 2117–2132, December 1998.
- GUIMARÃES, A. e COELHO, R. **Video Traffic Models Performance with Restricted and Non-Restricted Scaling Characterization.** *Proceedings of the International Telecommunications Symposium (ITS2002)*, p. 646–650, September 2002.
- HLUCHYJ, M. e KAROL, M. **Queueing in High-Performance Packet Switching.** *IEEE J. Select. Areas Commun.*, 6, n. 9, p. 1587–1597, December 1988.
- HOSKING, J. R. **Modeling Persistence In Hydrological Time Series Using Fractional Differencing.** *Water Resources Research*, 20, n. 12, December 1984.
- HUNTER, D. e ANDONOVIC, I. **Approaches to Optical Internet Packet Switching.** *IEEE Communications Magazine*, 38, n. 9, p. 116–122, September 2000.
- HUNTER, D. K., ET AL. **WASPNET: A Wavelength Switched Packet Network.** *IEEE Communications Magazine*, p. 120–129, March 1999.
- HURST, E. **Long-Term Storage Capacity of Reservoirs.** *American Society of Civil Engineers Trans.*, , n. 11, p. 770–799, April 1951.
- IZAL, M. e ARACIL, J. **On the Influence of Self-similarity on Optical Burst Switching Traffic.** *Proceedings of IEEE Globecom 2002*, November 2002.
- JACOBS, P. e LEWIS, P. **Discrete time series generated by mixtures III: Autoregressive processes (DAR(p)).** *Technical Report NPS55-78-022, Naval Postgraduate School*, 1978.
- JELENKOVIC, P.R., LAZAR, A.A. e SEMRET, E. **The Effect of Multiple Time Scales and Subexponentiality in MPEG Video Streams on Queueing Behavior .** *IEEE JSAC*, 15, n. 6, p. 1052–1071, August 1997.
- KAROL, M.J. **Shared-memory optical packet (ATM) switch.** *Proceedings of the SPIE: Multigigabit Fiber Commun.Syst.*, 2024 p. 212–222, 1993.
- KRUNZ, M. e MAKOWSKI, A. **Modeling Video Traffic Using M/G/ ∞ Input Processes: A Compromise Between Markovian and LRD Models.** *IEEE J. Select. Areas Commun.*, 16, n. 5, p. 733–748, June 1998.
- KU, P .C, CHANG-HASNAIN, C. J. e CHUANG, S. L. **A Proposal of Variable Semiconductor All-Optical Buffer.** *Electronics Lett.*, 38, n. 24, November 2002.
- LAW, A. e KELTON, W. *Simulation Modeling and Analysis.* McGraw-Hill Book Company, USA, 1982.
- LELAND, W.E., TAQQU, M.S., WILLINGER, W. e WILSON, D.V. **On the Self-Similar Nature of Ethernet Traffic (Extended Version).** *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2, n. 1, p. 1–15, February 1994.

- LEON-GARCIA, A. *Probability and Random Process for Electrical Engineering*. Addison-Wesley Publishing Company, Inc., USA, 1994.
- MANDELBROT, B. e VAN NESS, J. **Fractional Brownian Motions, Fractional Noises and Applications**. *SIAM Review*, 10, n. 4, p. 422–437, October 1968.
- MELAMED, B. e PENDARAKIS, D.E. **Modeling Full-Length VBR Video Using Markov-Renewal-Modulated TES Models**. *IEEE JSAC*, 16, n. 5, p. 600–611, June 1998.
- MICHIEL, H. e LAEVEN, K. **Teletraffic Engineering in a Broad-Band Era**. *Proceedings of the IEEE*, 85, n. 12, p. 2007–2033, December 1997.
- NORROS, I. **A Storage Model with Self-Similar Input**. *Queueing Systems*, p. 387–396, 1994.
- NORROS, I. **On the Use of Fractional Brownian Motion in Theory of Connectionless Networks**. *IEEE JSAC*, 13, n. 6, p. 953–962, August 1995.
- ONVURAL, R. *Asynchronous Transfer Mode Networks: Performance Issues*. Artech House, 2nd Edition, 1995.
- PAPADIMITRIOU, G.I., PAPAIOGLOU, C. e POMPORTSIS, A.S. **Optical Switching: Switch Fabrics, Techniques, and Architectures**. *Journal of Lightwave Technology*, 21, n. 2, p. 384–405, February 2003.
- PARK, K. e WILLINGER, W. *Self-Similar Network Traffic: An Overview*. John Wiley & Sons, Inc., 2000.
- PAXSON, V. e FLOYD, S. **Wide Area Traffic: The Failure of Poisson Modeling**. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 3, n. 3, p. 226–244, June 1995.
- PONTES, A.R.S. **Controle de Admissão de Conexões de Vídeo com Dependência Temporal**. Dissertação de Mestrado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2000.
- PONTES, R. e COELHO, R. **The Scaling Characteristics of the Video Traffic and its Impact on Acceptance Regions**. *Proceedings of the 17th International Teletraffic Congress*, 4 p. 197–210, December 2001.
- PONTES, R. e COELHO, R. **Admission Control for Video Connections Traffic Streams with Scaling Characteristics**. *Revista da Sociedade Brasileira de Telecomunicações (RevSBrT)*, 17, n. 2, p. 87–96, Dezembro 2002.
- QIAO, C. e YOO, M. **Choices, Features and Issues in Optical Burst Switching**. *Optical Networks Magazine*, 1, n. 2, p. 36–44, 2000.
- QIAO, C., ET AL. **Optical Burst Switching (OBS)-a New Paradigm for an Optical Internet**. *Journal of High Speed Networks*, 8, n. 1, p. 69–84, 1999.
- RAMASWAMI, R. e SIVARAJAN, K.N. *Optical Networks, A Practical Perspective*. Morgan Kaufmann Publishers, 2nd Edition, USA, 2002.

- RIEDI, R. e WILLINGER, W. **Toward an Improved Understanding of Network Traffic Dynamics.** *Self-Similar Network Traffic and Performance Evaluation*, John-Wiley & Sons p. 507–530, 2000.
- ROUSKAS, G.N. e XU, L. **Optical Packet Switching.** *to appear in Book "Optical WDM Networks: Past Lessons and Path Ahead"*, Kluwer, Norwell, Massachusetts, 2004.
- RYU, B. e ELWALID, A. **The Importance of Long-Range Dependence of VBR Video Traffic in ATM Traffic Engineering: Myths and Realities.** *Proceedings of the ACM/SIGCOMM*, 1996.
- SANTOS, E. L. JR. e COELHO, R. F. **Optical Buffer and Link Dimensioning to Support Video Traffic with Scaling Characteristics.** *Submitted to the IEEE/GLOBECOM 2003*, 2003a.
- SANTOS, E. L. JR. e COELHO, R. F. **Optical Packet and Burst Switched Networks Performance for Time-Dependent Video Traffic.** *Revista da Sociedade Brasileira de Telecomunicações*, 18, n. 2, p. 132–142, outubro 2003b.
- SANTOS, E. L. JR. e COELHO, R. F. **Optical Buffer and Link Dimensioning to Support Video Traffic with Scaling Characteristics.** *Anais do XX Simpósio Brasileiro de Telecomunicações (SBT03)*, p. 116–121, Outubro 2003c.
- SINGH, Y.N. **Introduction to Photonic Packet Switching.** *IEEE Student Branch's Technical Festival*, February 2001.
- SIRÉN, E. e HYYTIÄ, E. **Delay Line Configurations in Optical Burst Switching with JET Protocol.** Technical Report TD(02)24, COST279, May 2002. URL <http://www.tct.hut.fi/tutkimus/oan/publ/cost279td0224-jet.pdf>.
- TECHNOLOGY, ADVANCED COMMUNICATIONS e SERVICES. <http://www.infowin.org/acts/analysys/intro/chap1.htm>.
- TURNER, J. **Terabit Burst Switching.** *Journal of High Speed Networks*, 8, n. 1, p. 3–16, 1999.
- VETTERLI, M. e KOVACEVIC, J. **Wavelets and Subband Coding.** Prentice Hall, 1985.
- XU, L. **Performance Analysis of Optical Burst Switched Networks.** *Tese (Doctor of Philosophy) - North Caroline State University*, 2002.
- XU, L., PERROS, H. e ROUSKAS, G. **Techniques for Optical Packet Switching and Optical Burst Switching.** *IEEE Communications Magazine*, p. 136–142, January 2001.
- YANG, Q. e BERGMAN, K. **Traffic Control and WDM Routing in the Data Vortex Packet Switch.** *IEEE Photonics Technology Letters*, 14, n. 2, p. 236–238, February 2002.

YOO, M. e QIAO, C. **Just-enough-time (JET): A High Speed Protocol for Bursty Traffic in Optical Networks.** *Proceedings of the IEEE/LEOS Technologies for Global Information Infrastructure*, p. 26–27, August 1997.

YOO, M., QIAO, C. e DIXIT, S. **QoS Performance in IP over WDM Networks.** *IEEE J. Select. Areas Commun.*, 18, n. 10, p. 2062–2071, October 2000.

7 APÉNDICES

7.1 APÊNDICE 1: OUTRAS ARQUITETURAS DE COMUTADORES ÓPTICOS DE PACOTES

7.1.1 BROADCAST AND SELECT (KEOPS)

Nesta arquitetura os pacotes de todas as entradas, em distintos comprimentos de onda, são enviados para todas as saídas, através de um *broadcast*. Acionando as respectivas portas ópticas de comutação, determina-se a saída destino do pacote, sendo um comprimento de onda por saída, por *slot* de tempo. Foi implementada na Europa como parte do projeto KEOPS (*Keys to Optical Packet Switching*) (XU, 2001) no projeto TECHNOLOGYACTS (*Advanced Communications Technology and Services*). A FIG.7.1 ilustra uma arquitetura genérica do comutador KEOPS.

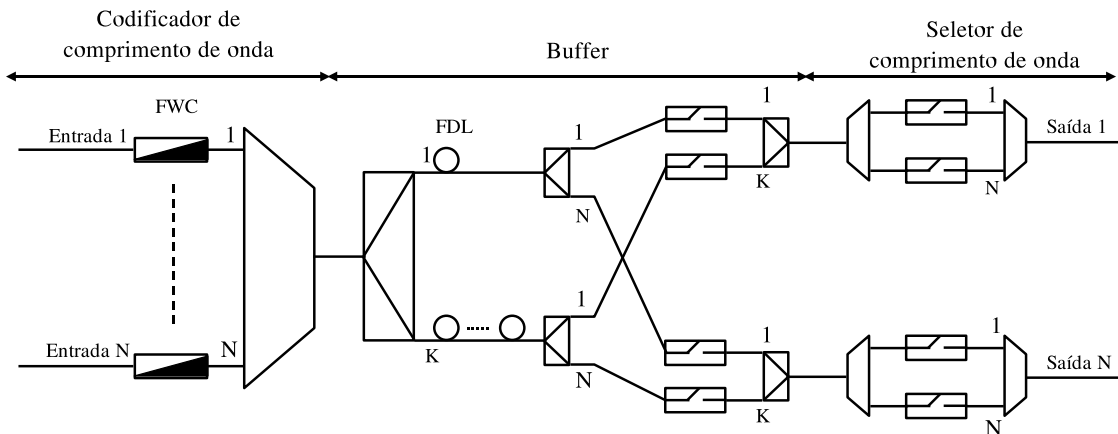


FIG. 7.1: Arquitetura genérica do comutador KEOPS

Os pacotes em cada entrada do comutador estão em um determinado comprimento de onda, que no codificador de comprimento de onda é convertido por um conversor fixo (FWC) e levado a um multiplexador de N entradas.

Cada FDL introduz um retardo proporcional ao número da FDL, nos pacotes que passarem por ela. A K-ésima FDL introduzirá um retardo de K *slots* nos pacotes. Em cada FDL estarão simultaneamente N comprimentos de onda distintos por *slot* de tempo.

Na saída das FDLs, um conjunto de K distribuidores, N combinadores e portas ópticas conduzem os pacotes multiplexados de uma das K FDLs, ao seletor de comprimento de onda de uma das N saídas.

O *seletor de comprimento de onda* selecionará apenas um dos comprimentos de onda, por saída, dos N recebidos multiplexados, selecionando assim o pacote.

7.1.2 DATA VORTEX

Esta arquitetura (YANG, 2002) não utiliza *buffer* óptico e foi proposta com intuito de facilitar a implementação, minimizando o número de portas ópticas necessárias. Utiliza uma estrutura em hierarquia, temporização síncrona e sinalização de controle distribuído para evitar contenção. O esquemático da topologia do *Data Vortex* é ilustrado na FIG.7.2.

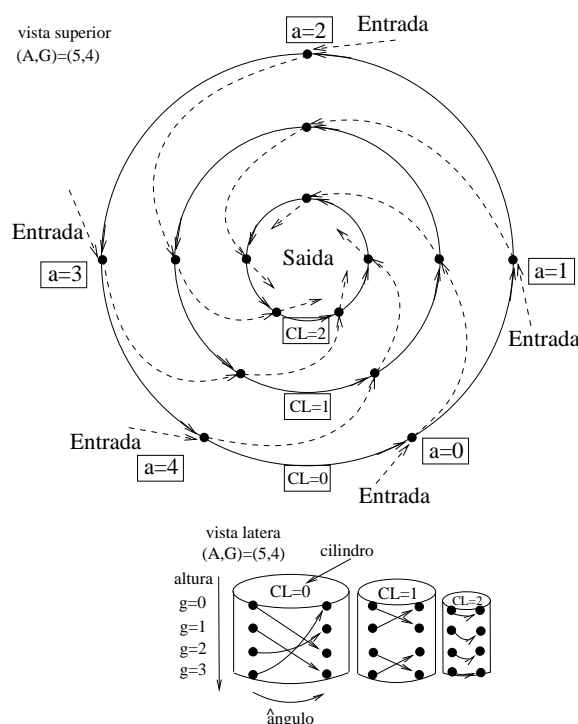


FIG. 7.2: Esquemático da topologia do *Data Vortex*.

Os pacotes são processados de forma síncrona, por *slot* de tempo, dentro da matriz de comutação. A matriz é caracterizada por um conjunto de cilindros concêntricos com parâmetros altura G , ângulo a e número de cilindros CL , onde $CL = \log_2(G) + 1$. Esses parâmetros definem o número de nós de roteamento. Cada cilindro CL é composto por $G \times a$ nós, num total de $G \times a \times (\log_2(G) + 1)$ nós de comutação. Portanto, a matriz de comutação terá $G \times a$ nós de entrada por $G \times a$ nós de saída.

Os pacotes são inseridos no cilindro externo ($CL = 0$), vindos da porta de entrada do comutador óptico, e saem do comutador pelos nós do cilindro mais interno ($c = \log_2(G)$). Os pacotes são auto-roteados do cilindro externo em direção ao interno, através da dimensão ângulo. A cada *slot* de tempo os pacotes avançam um ângulo em direção ao

cilindro interno, pela linha tracejada, ou permanecem dentro do mesmo cilindro. Cada progresso cilíndrico altera um bit específico no cabeçalho de endereço binário, mas o pacote permanece na mesma altura.

O procedimento de roteamento hierárquico possibilita o emprego de uma técnica de codificação de cabeçalho WDM. Nessa técnica é feito o roteamento baseado em um bit de cabeçalho, através de filtragem do comprimento de onda no processo de recuperação do cabeçalho (YANG, 2002). Os bits do cabeçalho estão a uma taxa menor que a taxa do pacote, então não há necessidade de processamento eletrônico de alta velocidade dentro do nó.

O que viabiliza a comutação sem *buffer* interno e simplifica a lógica de roteamento é o mecanismo de sinalização de controle distribuído entre os nós (YANG, 2002). Com a temporização síncrona embutida, consegue-se programar o fluxo de tráfego entre nós vizinhos de forma a evitar o conflito de pacotes. Para implementar esse esquema, aplicam-se linhas de controle entre os pares de nós. Mensagens de controle passam entre os nós antes da chegada dos pacotes, estabelecendo o caminho correto. O controle restringe a passagem de apenas um pacote em cada nó por *slot* de tempo. O *Data Vortex* não possui *buffer* interno, mas o efeito é como se existisse um, ao fazer o pacote recircular nos cilindros. Os *buffer* são alocados nas portas de entrada e saída para controlar o fluxo de dados entrando e saindo do comutador (PAPADIMITRIOU, 2003).

7.1.3 WASPNET

Esta arquitetura utiliza um esquema de *buffer feedback*, fazendo os pacotes recircularem pelas FDLs, que integram algumas saídas do comutador às entradas, como forma de resolver a contenção.

A versão com um comprimento de onda por entrada e saída está ilustrada na FIG. 7.3. No projeto *Wavelength Switch Optical Packet Network* foi proposta uma rede óptica de pacotes com comutação de comprimento de onda (HUNTER, 1999). É composta de uma grade de guia de onda (AWG - *arrayed waveguide gratings*) de $2N \times 2N$, N conjuntos de FDLs e quatro conjuntos de N TWCs. Um TWC para cada porta de entrada ou saída da AWG.

O comutador pode ser dividido em dois estágios, o primeiro cujo objetivo é evitar a colisão de pacotes e o segundo que faz a comutação propriamente dita. Aqui esses estágios são implementados juntos, usando um conjunto de N FDLs e uma AWG de $2N$ entradas e $2N$ saídas.

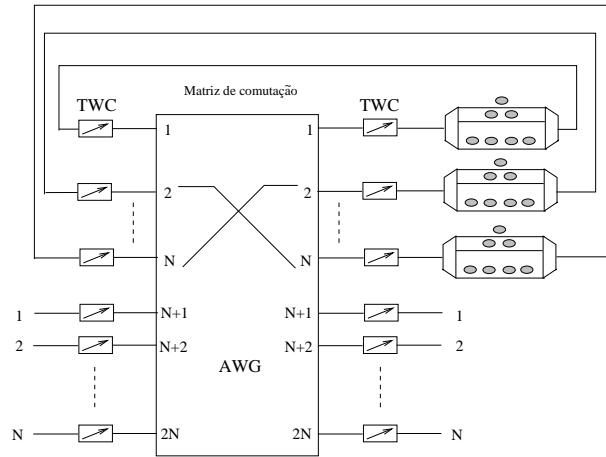


FIG. 7.3: Arquitetura do comutador WASPNET

Os $2N$ TWC na entrada da AWG são usados para selecionar as saídas da AWG desejadas. Na saída do AWG, os TWC que estão nas portas de 1 a N são usados para selecionar as FDLs através dos quais os pacotes ópticos irão re-circular. Os TWC das saídas restantes de $N+1$ à $2N$ irão converter os pacotes com destino à saída do comutador, para valores de comprimento de ondas conforme a interface de saída requerida.

A disposição dos *buffers* de re-circulação neste comutador possibilita a implementação de prioridade de pacotes. Além de ajustar o comprimento de onda de saída conforme a necessidade, os TWCs das saídas do comutador agora executam o importante papel de participar na decisão final da rota a qual o pacote irá seguir. A unidade de controle aciona todos esses dispositivos para garantir que não haverá colisão entre pacotes de um mesmo comprimento de onda.

7.2 APÊNDICE 2: COMPONENTES ÓPTICOS

O desenvolvimento das redes ópticas comutadas WDM esbarram em restrições tecnológicas e na indisponibilidade de componentes e dispositivos ópticos. Dependendo da técnica utilizada, a comutação óptica requer dispositivos ópticos capazes de operar a altas velocidades. Os dispositivos, como portas e conversores de comprimento de onda, estão sendo aprimorados e os atualmente disponíveis trazem muitas restrições à implementação de redes ópticas comutadas (RAMASWAMI, 2002). 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. Apesar de algumas alternativas para a comutação óptica de pacotes terem sido apresentadas, na realidade a sua implementação de forma comercial, por ora, torna-se impraticável.

As matrizes de comutação são os principais obstáculos à implementação de um comutador óptico, devido às restrições dos componentes que a compõe. Tais restrições limitam o número de unidades que podem ser conectadas em série, limitando o número de portas que se consegue montar. As restrições aparecem sob a forma de distorções e atenuação que o componente introduz e se tornam inviáveis de serem compensadas com a tecnologia disponível, devido ao custo.

Papadimitriou faz um resumo em (PAPADIMITRIOU, 2003) dos componentes disponíveis para a implementação de matrizes de comutação, conforme mostra a TAB.7.1.

TAB. 7.1: Resumo de elementos de comutador óptico.

Tecnologia	Vantagem	Desvantagem	Perda de inserção (dB)	Tempo de comutação
Optomechanical 8 x 8	Perda, crosstalk e custo	Velocidade e escalabilidade	0.5	4 ms
MEMS 2D 8 x 8	Simplicidade de controle	Perda elevada e velocidade	0.2 - 3.7	12 ms
MEMS 3D 8 x 8	Até 1000 portas	Perda, custo e velocidade	0.2 - 3.7	12 ms
Eletro-óptico 8 x 8	Velocidade	Alta perda de inserção e custo	9	5 ns
Termo-óptico 8 x 8	Integrar atenuação e seleção	alta potência dissipada	8	3 ms
Cristal líquido 2 x 2	Disponibilidade e desempenho	Temperatura e velocidade	1.4	5 ms
Bubble 2 x 2	Escalabilidade e tecnologia	Perda, temperatura e velocidade	2.5 - 7.5	10 ms
Opto-acústico 1 x N	Comutação simultânea e velocidade		6	3 μ s

As MEMS da TAB.7.1 são dispositivos microeletromecânicos (MEMS - *Microelectromechanical system devices*). Na tecnologia com MEMS 2D, a perda é muito elevada e é necessário a utilização de amplificador óptico.

Além dos elementos da TAB.7.1 usados como elementos de comutação na matriz de comutação óptica, outros componentes fazem parte da arquitetura de comutadores ópticos. São componentes necessários para multiplexação e comutação de comprimento de onda, como conversores de comprimento de onda fixo e variáveis, portas ópticas, multiplexadores e FDLs.

- O ***multiplexador*** é o elemento que multiplexa vários comprimentos de onda distintos, proveniente de entradas distintas, e os coloca em uma única saída. O ***demultiplexador*** faz a operação inversa. Com uma entrada e várias saídas, recebe vários comprimentos de onda multiplexados e os demultiplexa, entregando um comprimento de onda distinto em cada saída.

O demultiplexador requer um mecanismo de seleção de comprimento de onda e pode ser classificado em duas categorias. Os *demultiplexadores baseados em difração* usam um elemento dispersivo angular, como uma grade de difração, o qual dispersa espacialmente a luz incidente em vários componentes de comprimento de onda. Os *demultiplexadores baseados em interferência* utilizam filtros ópticos e acopladores direcionais. Os dois tipos também podem ser usados como multiplexadores, invertendo a direção de propagação (AGRAWAL, 1997) .

- O ***splitter*** ou distribuidor, possui uma única entrada onde recebe um comprimento de onda e os distribui, replicando a entrada identicamente por todas as suas saídas. É um componente passivo.
- A ***FDL*** é composta por muitos metros (ou até quilômetros) de fibra óptica enrolados de maneira a introduzir um retardo na saída do sinal de entrada, devido ao longo trajeto que o sinal irá percorrer antes de atingir a saída. Assim um $\lambda_e(t)$ que chega no instante t na entrada do FDL, sairá no instante $(t + N)$, onde N é o número de intervalos de tempos de atraso introduzido pela FDL.
- O conversor fixo de comprimento de onda (***FWC - Fixed Wavelength Converter***) converte o comprimento de onda de entrada λ_e qualquer, em um comprimento de onda fixo de saída λ_1 . Uma outra versão de conversor de comprimento de onda, o ***TWC*** permite que seja selecionado o comprimento de onda do sinal convertido resultante na saída. As principais técnicas aplicadas na conversão de comprimento de onda utilizam o amplificador óptico semiconductor (SOA - *Semiconductor Optical Amplifier*). Essas técnicas são: a modulação de ganho cruzado (XGM - *Cross Gain*

Modulation), modulação de fase cruzada (XPM - *Cross Phase Modulation*) e a mistura de quatro ondas (FWM - *four-wave mixing*) (AGRAWAL, 1997).

- O **Amplificador óptico** amplifica a luz incidente através da emissão estimulada. O ganho óptico é obtido através do bombeamento eletrônico ou óptico, dependendo do tipo do amplificador, e depende do comprimento de onda do sinal incidente, assim como da intensidade do feixe. O laser semiconductor é uma fonte de luz que funciona como um amplificador óptico removendo-se a realimentação (AGRAWAL, 1997). O ganho do amplificador depende do comprimento de onda do sinal amplificado. Existem outros tipos de amplificadores que usam diferentes elementos e formas de fazer bombeamento. O amplificador *Raman*, por exemplo, usa o espalhamento de Raman estimulado, que ocorre em fibras de sílica quando um intenso sinal de bombeio se propaga pela fibra, para criar fótons de nível de energia menor na frequência do sinal original.

Uma importante categoria de amplificadores ópticos utiliza elementos de terras raras como meio de ganho. Esses elementos são introduzidos no núcleo da fibra durante o processo de fabricação. O elemento dopante determina a largura de faixa do ganho e o comprimento de onda de operação. Diferentes elementos podem ser usados, cobrindo uma ampla faixa de comprimentos de onda. Os amplificadores mais difundidos são os dopados com Érbio (*EDFA - Erbium Doped Fiber Amplifier*) e operam próximo à faixa de $1.55\mu m$, região na qual a perda na fibra é mínima. Os EDFAs têm capacidade de ganho de $30dB$ ou mais, com potência de saída de $17dBm$ ou mais.

Além de ser usado na conversão de comprimento de onda, o SOA pode ser usado como elemento chaveador ou porta óptica, através da variação da tensão de polarização. Entretanto é um componente caro e difícil de implementar sua independência à polarização (PAPADIMITRIOU, 2003).

Todo amplificador degrada a relação sinal-ruído, SNR, do sinal amplificado devido à introdução de ruído causado pela emissão espontânea durante a amplificação. Isso limita o número de amplificadores que podem ser cascadeados, pois o ruído é cumulativo. Os parâmetros de desempenho de amplificadores ópticos são ganho, ganho plano, nível de ruído e potência de saída.

7.3 APÊNDICE 3: ALGORITMO PARA GERAÇÃO DE PROCESSO $M/G/\infty$

Utilizando-se a linguagem C implementamos o algoritmo apresentado em (KRUNZ, 1998) para gerar o tráfego de vídeo. Os principais passos deste algoritmo são:

1. Leitura do arquivo da seqüência original codificada;
2. Estimação da média, variância e β do arquivo lido;
3. Cálculo da função distribuição de probabilidade (FDP) complementar do trecho da seqüência;
4. Geração de amostras com distribuição de Poisson utilizando os parâmetros média, variância da seqüência original;
5. Cálculo dos parâmetros da função Gamma (α e β);
6. Geração da distribuição Gamma com os parâmetros acima;
7. Cálculo do ponto de divergência entre a FDP complementar da função Gamma e da seqüência original;
8. Cálculo dos parâmetros da função Pareto (α e a);
9. Geração da distribuição Pareto com os parâmetros acima;
10. Cálculo da FDP da seqüência gerada (σ), admitindo-se ser Poisson;
11. Geração das amostras aplicando a transformação híbrida Gamma/Pareto.

A rotina implementada foi avaliada com as seqüências³⁸ de vídeo codificadas *StarWars* (*JPEG*), *Silence* (*H.263*) e *Race* (*MPEG-1*), conforme a Seção 4.1.

³⁸Disponíveis em: StarWars - <ftp://ftp.research.telcordia.com/pub/vbr.video.trace/>; Silence of the Lambs - <http://www-tnk.ee.tuberlin.de/fitzek/TRACE/ltvt.html>; Race - <http://nero.informatik.uniwuerzburg.de/MPEG/traces/>.

7.4 APÊNDICE 4: OUTROS MODELOS DE TRÁFEGO DE VÍDEO

Muitos modelos têm sido propostos para tráfego com dependência, principalmente após a descoberta de dependência temporal em tráfego Ethernet e WWW (CROVELLA, 1996) e (PARK, 2000). Além dos processos fBm e $M/G/\infty$ vistos, apresentaremos a seguir uma breve introdução a outros modelos que exploram o grau de dependência temporal.

7.4.1 MODELO ARIMA FRACIONÁRIO

Um processo ARIMA(p,d,q) X_k é definido através da relação recursiva (BOX, 1970)

$$\Phi(B)\Delta^d X_t = \Theta(B)\epsilon_t,$$

onde $\Phi(B)$ e $\Theta(B)$ são polinômios de grau p e q , respectivamente,

$$\Phi(B) = 1 - \phi_1 B - \phi_2 B^2 - \dots - \phi_p B^p$$

$$\Theta(B) = 1 - \theta_1 B - \theta_2 B^2 - \dots - \theta_q B^q$$

e B representa o operador atraso, ou seja, $BX_t = X_{t-1}$. O operador diferenciação de ordem d , Δ^d , é expresso recursivamente pela relação $\Delta^d = \Delta(\Delta^{d-1}X_t)$ com $\Delta X_t = X_t - X_{t-1}$ e ϵ_t é uma seqüência de variáveis aleatórias independentes e identicamente distribuídas (i.i.d.), ou seja, um ruído branco.

Os processos ARIMA fracionários (HOSKING, 1984) são extensões do modelo ARIMA tradicional, onde a diferenciação pode ser de ordem fracionária, ou seja, d pode tomar valores não inteiros. Para isto, utilizamos a seguinte identidade

$$(1 - B)^d = \sum_{k=0}^{\infty} \binom{d}{k} (-B)^k$$

com os coeficientes binomiais dados por

$$\binom{d}{k} = \frac{d!}{k!(d-k)!} = \frac{\Gamma(d+1)}{\Gamma(k+1)\Gamma(d-k+1)}$$

onde $\Gamma(x)$ é a função Gamma. No modelo ARIMA fracionário o parâmetro d representa o grau de dependência temporal. Para processos de variância finita, d relaciona-se com o parâmetro de *Hurst* através de $H = d + 0.5$. Uma das limitações do processo ARIMA corresponde aos algoritmos de geração de seqüências, que possuem complexidade computacional elevada ($O(n^2)$) (GARRETT, 1994), o que requer longos períodos de processamento.

7.4.2 FONTES ON-OFF COM CAUDA PESADA

A agregação de fontes *On-Off* pode exibir dependência temporal se a distribuição dos períodos ativos ou inativos das fontes possui cauda pesada (LELAND, 1994); e se o número de fontes for suficientemente grande, pode convergir para um processo fBm (MICHIEL, 1997). Uma variável aleatória X possui distribuição com cauda pesada se $P[X > x] \sim cx^\alpha$, para $x \rightarrow \infty$. Em conseqüência, X possui variância infinita ($Var[X] = \infty$). Um exemplo de distribuição com cauda pesada é dado pela distribuição de Pareto (GARRETT, 1994) e (PAXSON, 1995). A agregação de infinitas fontes *On-Off* com esta característica tende a uma fonte de tráfego do tipo fBm. Logo, é necessária uma agregação de muitas fontes para replicar as propriedades de dependência do processo fBm. Isto representa uma deficiência ou seja, as características do modelo dependem do número de fontes *On-Off* utilizadas. Quanto mais fontes, melhor o modelo. Isto reforça a importância do uso do processo fBm, visto que é um caso limite da agregação de infinitas fontes *On-Off* com cauda pesada.

7.5 APÊNDICE 5: ESTIMADORES DO PARÂMETRO DE HURST

Com o objetivo de dimensionar reservatórios de água, Harold Edwin Hurst fez estudos (HURST, 1951) sobre o comportamento do nível e vazão do rio Nilo, intensidades de chuva e outros fenômenos naturais. Hurst pode contar com uma grande massa de dados na época. Nesses estudos, verificou a presença de um parâmetro k , que se mantinha dentro de uma pequena faixa, mesmo para diferentes processos. Este parâmetro, que posteriormente levou o nome do próprio Hurst, é verificado em tráfegos com dependência temporal. Na próxima seção veremos o estimador R/S (*Rescaled Statistics*), desenvolvido por Hurst. Nas estimações feitas em nossa pesquisa, usamos o pacote HEP (*Hurst Estimator Package*) com as rotinas dos estimadores implementadas em (PONTES, 2000) para estimar o H das seqüências que alimentam o computador óptico, assim como o H da seqüência na saída, após passar pelo computador. Além do R/S, foram usados os estimadores Higuchi (BARNSELEY, 1988) e AV (ABRY, 1998), do mesmo pacote, descritos nas Seções 7.5.2 e 7.5.3, respectivamente.

7.5.1 ESTIMADOR R/S

Considerando uma seqüência de variáveis aleatórias $\{X_i\}$, com somas parciais $Y(n) = \sum_{i=1}^n X_i$ e variância no intervalo dada por $S^2(n) = (1/n) \sum_{i=1}^n X_i^2 - (1/n)^2 Y(n)^2$, a estatística R/S é obtida fazendo:

$$R(n)/S(n) = \frac{1}{S(n)} \left[\max_{0 \leq t \leq n} (Y(t) - (t/n)Y(n)) - \min_{0 \leq t \leq n} (Y(t) - (t/n)Y(n)) \right] \quad (7.1)$$

Deste resultado, observa-se que $E[R(n)/S(n)] \sim C_1 n^H$ para $n \rightarrow \infty$ onde C_1 é uma constante positiva. Dividindo-se uma seqüência de tamanho N em K blocos, de tamanho N/K , calcula-se a estimativa de $R(n)/S(n)$ em cada bloco. Para valores de $n < N/K$ são obtidas K estimativas de $R(n)/S(n)$ em cada bloco e para $n > N/K$ obtém-se tantos valores de $R(n)/S(n)$ quanto possível, partindo-se dos pontos iniciais de cada bloco. Através da regressão linear sobre os pontos obtidos, estima-se o valor de H pela inclinação da reta em um gráfico log-log de $R(n)/S(n)$ versus n . A FIG. 7.4 ilustra exemplos do processo de estimação do grau de dependência H pelo método R/S para seqüências com $H = 0.2$, $H = 0.5$ e $H = 0.8$.

Na estimação, deve-se escolher uma faixa de valores válidos para n , tal que $n \in [n_{inf}, n_{sup}]$. Os resultados assintóticos para a estatística R/S ainda não se manifestam

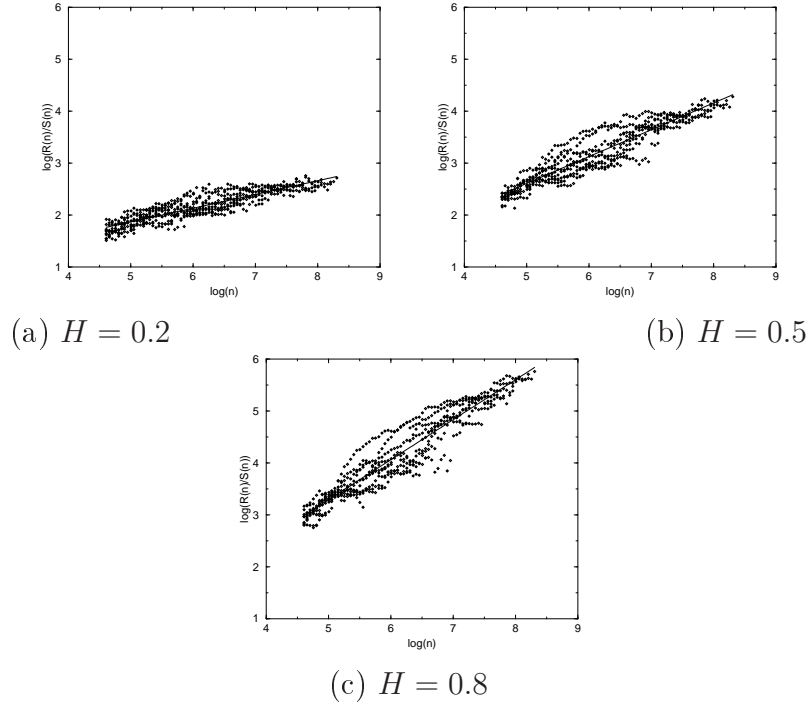


FIG. 7.4: Estimação do parâmetro de Hurst através da estatística R/S para processos com (a) $H = 0.2$, (b) $H = 0.5$ e (c) $H = 0.8$.

para valores de $n < n_{inf}$, sendo influenciados por efeitos de dependência de curta duração. Acima do limite superior, $n > n_{sup}$, existem poucos pontos disponíveis para obter estimativas razoáveis de $E[R(n)/S(n)]$. Assim, a partir da análise visual dos pontos obtidos, escolhe-se os limites n_{inf} e n_{sup} .

7.5.2 ESTIMADOR HIGUCHI

Este método foi desenvolvido considerando a dimensão fractal (BARNSELY, 1988) de uma série de amostras. Obtém-se a dimensão fractal ou dimensão de Hausdorff (BARNSELY, 1988) através da análise de um conjunto de pontos num espaço de dimensão p . Cobrindo-se todos esses pontos com hiper-cubos de lado ϵ , define-se a dimensão fractal D desse conjunto de pontos como:

$$D = \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \frac{\log[N(\epsilon)]}{\log(\epsilon)} \quad (7.2)$$

onde $N(\epsilon)$ é o número máximo de hiper-cubos de lado ϵ necessário para cobrir todo o conjunto de pontos. Se montarmos um gráfico de $\log(N(\epsilon))$ por $\log(\epsilon)$, a inclinação será uma estimativa da dimensão fractal. A dimensão fractal está relacionada ao H através de $D = 2 - H$.

Consideremos uma seqüência de amostras aleatórias $\{X_i\}$, com somas parciais $Y(n) = \sum_{i=1}^n X_i$. Obtém-se agora k seqüências derivadas

$$Y_k^m = Y_m, Y_{m+k}, Y_{m+2k}, \dots, Y_{m+\lfloor \frac{N-m}{k} \rfloor k}, \quad m = 1, 2, \dots, k \quad (7.3)$$

Para cada seqüência derivada Y_k^m , calcula-se o comprimento normalizado da curva:

$$L_m(k) = \frac{N-1}{k^2 \lfloor \frac{N-m}{k} \rfloor} \sum_{i=1}^{\lfloor \frac{N-m}{k} \rfloor} |Y(m+ik) - Y(m+(i-1)k)|$$

O comprimento da curva $L(k)$ para cada intervalo k é

$$L(k) = \frac{1}{k} \sum_{m=1}^k L_m(k)$$

Nota-se que $E[L(k)] \sim C_2 k^{-D}$ para $k \rightarrow \infty$, onde $D = 2 - H$. Através da regressão linear sobre os pontos obtidos, estima-se o valor de H pela inclinação da reta em um gráfico log-log de $R(n)/S(n)$ versus n .

7.5.3 ESTIMADOR AV

O estimador Abry-Veitch (AV) utiliza a transformada discreta de *wavelets* (DWT - *Discrete Wavelets Transform*) para decompor amostras de um processo em seqüências de aproximação (passa-baixa) e detalhe (passa-banda ou passa-alta). As seqüências são obtidas através de filtros digitais com coeficientes determinados pela *wavelets*. Para manter a compatibilidade com a proposta original do estimador apresentado em (ABRY, 1998), quando foi implementado no pacote HEP em (PONTES, 2000) utilizou-se as *wavelets* de *Daubechies* com diferentes números de coeficientes, apesar de não existir restrição na escolha das *wavelets*. Como exemplo, para 4 coeficientes os filtros passa-baixa $H_0(z)$ e passa-banda $H_1(z)$ são dados por:

$$H_0(z) = +0.4829629 + 0.8365163z^{-1} + 0.2241439z^{-2} - 0.129409522551z^{-3}$$

$$H_1(z) = -0.1294095 - 0.2241439z^{-1} + 0.8365163z^{-2} - 0.482962913145z^{-3}$$

A seqüência de amostras é decomposta em sucessivas seqüências de aproximação e detalhe. Estas seqüências são obtidas aplicando-se a filtragem digital em cascata. A saída de um estágio de filtros é novamente aplicada ao estágio de filtros e assim por diante. Este processo é exemplificado pela FIG. 7.5 para os três primeiros estágios de

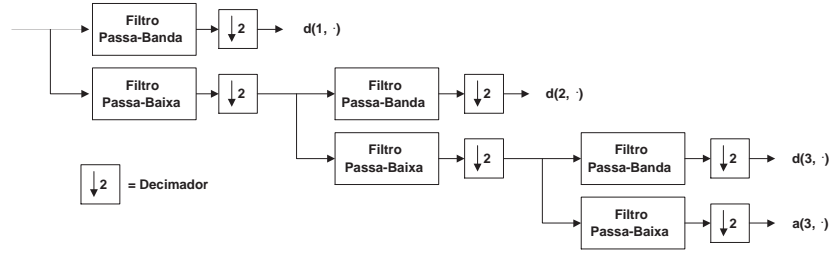


FIG. 7.5: Banco de filtros para estimador AV

decomposição. Cada seqüência de detalhe obtida em um estágio é denominada $d(j, k)$ $j, k = 1, 2, \dots$ onde j representa a escala de decomposição no banco de filtros e k o índice de cada coeficiente gerado no banco de filtro em uma dada escala. Cada par de filtros é seguido de decimadores e por isso, a taxa de geração das seqüências $d(j, k)$ é reduzida à metade após um estágio de filtragem. O estimador AV pode ser descrito nas seguintes etapas:

1. Decomposição em *wavelets*: A DWT é aplicada nas amostras, gerando as seqüências de detalhe $d(j, k)$. A DWT é obtida através de um algoritmo piramidal que é descrito em (VETTERLI, 1985). Esse algoritmo possui baixa complexidade computacional de $O(n)$, onde n é o número de amostras.
2. Estimação da variância dos coeficientes de detalhe: Para cada escala j , estima-se a variância dos coeficientes $d(j, k)$ denominada μ_j . Como estes coeficientes possuem média nula, tem-se que $\mu_j = (1/n_j) \sum_k d(j, k)^2$, onde n_j indica o número de coeficientes obtidos na escala j . Pode-se mostrar que, o valor de $E[\mu_j]$ segue uma lei de potência em j com expoente $\alpha = 2H - 1$, tal que

$$E[\mu_j] = c_\gamma j^{2H-1}$$

3. Estimação do parâmetro H : Para a estimação do parâmetro H , plota-se em um gráfico de $y_j = \log_2(\mu_j)$ versus j , denominado diagrama log-escala. Usando uma regressão linear ponderada, obtém-se a inclinação α do gráfico e o parâmetro H é estimado através da relação $H = (1 + \alpha)/2$.