

Universidade Estadual de Campinas
Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação

Contribuições ao Estudo de Redes Ópticas Híbridas WDM/OCDM

Autor: Fábio Renan Durand
Orientador: Prof. Dr. Edson Moschim
Co-orientador: Prof. Dr. Marcelo Francisco Abbade

Tese de Doutorado apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica. Área de concentração: **Telecomunicações e Telemática**

Banca Examinadora

Amílcar Careli César, Dr.SEL/EESC/USP
Luiz Henrique Bonani Nascimento, Dr.CESET/Unicamp
Mário Tosi Furtado, Dr. CPqD
Edson Moschim, Dr. DSIF/FEEC/Unicamp
Felipe Rudge Barbosa, Dr.DSIF/FEEC/Unicamp
Furio Damiani, Dr.DSIF/FEEC/Unicamp

Campinas, SP
Dezembro/2007

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE -
UNICAMP

D931c Durand, Fábio Renan
Contribuição ao estudo de redes ópticas híbridas
WDM/OCDM / Fábio Renan Durand. --Campinas, SP:
[s.n.], 2007.

Orientadores: Edson Moschim, Marcelo Francisco
Abbade
Tese (doutorado) - Universidade Estadual de Campinas,
Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação.

1. Comunicações óticas. 2. Fibras óticas. 3. Sistemas de
transmissão de dados. 4. Multiplexação. I. Moschim,
Edson. II. Abbade, Marcelo Francisco. III. Universidade
Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Elétrica e
de Computação. IV. Título.

Título em Inglês: Contributions for the Analysis of Hybrid WDM/OCDM
Networks

Palavras-chave em Inglês: Optical communications, Optical fibers, Data
transmission systems, Multiplexing

Área de concentração: Telecomunicações e Telemática

Titulação: Doutor em Engenharia Elétrica

Banca examinadora: Amílcar Careli César, Luiz Henrique Bonani
Nascimento, Mário Tosi Furtado, Felipe Rudge
Barbosa, Furio Damiani

Data da defesa: 18/12/2007

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Elétrica

COMISSÃO JULGADORA - TESE DE DOUTORADO

Candidato: Fábio Renan Durand

Data da Defesa: 18 de dezembro de 2007

Título da Tese: "Contribuições ao Estudo de Redes Ópticas Híbridas WDM/OCDM"

Prof. Dr. Edson Moschim (Presidente):

Prof. Dr. Amílcar Careli César:

Dr. Mário Tosi Furtado:

Prof. Dr. Luiz Henrique Bonani do Nascimento:

Prof. Dr. Felipe Rudge Barbosa:

Prof. Dr. Furio Damiani:

Resumo

Neste trabalho é realizada a análise da aplicação de códigos ópticos ortogonais (OOC) da tecnologia de multiplexação por divisão de códigos ópticos (OCDM) em redes ópticas híbridas multiplexadas pela divisão de comprimentos de onda e códigos ópticos (WDM)/OCDM e em redes ópticas comutadas por rajadas (OBS). As contribuições da tese consistem da proposta e análise da aplicação da camada de transporte WDM/OCDM em redes OBS roteadas por comprimento de onda (WR-OBS), modelagem matemática de comutadores ópticos (OXC) WDM/OCDM considerando os parâmetros dos códigos OOC, estudo dos efeitos da dispersão por polarização modal (PMD) em redes ópticas WDM/OCDM e, finalmente, a proposta e análise da utilização processamento óptico da sinalização baseada em códigos OOC. Em função dos resultados obtidos se verifica que a aplicação dos códigos ópticos OOC nas redes ópticas de transporte WDM/OCDM, redes de rajadas e redes WR-OBS aumenta o desempenho destas redes por meio da diminuição da probabilidade de perdas de pacotes, latência dos pacotes e aumento da utilização da rede.

Palavras-chave: Códigos ópticos ortogonais (OOC), dispersão por polarização modal (PMD), redes ópticas WDM/OCDM, redes ópticas comutadas por rajadas (OBS).

Abstract

This work presents an analysis of optical orthogonal codes (OOC) of optical code division multiplexing (OCDM) in optical networks. These networks uses the hybrid technology of wavelength division multiplexing and optical code division multiplexing (WDM/OCDM) and, optical burst switching networks (OBS). The main contributions are the analyze and propose of WDM/OCDM transport network at wavelength routed OBS networks (WR-OBS), WDM/OCDM optical crossconnects (OXC) modeling considering OOC parameters, study of polarization mode dispersion (PMD) effects in optical WDM/OCDM networks and, finally an OBS architecture with OOC label processing is analyzed. Analytical and simulation results indicate that OOC utilization in WDM/OCDM transport networks, OBS and WR-OBS networks increases the network performance by decrease of packet error rate, latency and network utilization increase.

Keywords: Orthogonal optical codes (OOC), polarization mode dispersion (PMD), WDM/OCDM optical networks, optical burst switching (OBS).

*Dedico este trabalho aos mais pais, Paulo e Ester, a minha
irmã Rubia, a minha esposa Juliana e ao meu filho Felipe.*

Agradecimentos

Agradeço a Deus pelo dom da vida e por ter sido sempre o pilar de apoio em todos os momentos da minha existência.

Agradeço o meu orientador, Prof. Edson Moschim, por ter me dado a oportunidade de realizar este trabalho e pelo seu apoio durante o seu desenvolvimento.

Agradeço o meu co-orientador, Prof. Marcelo Abbade e o Prof. Felipe Rudge pelas contribuições realizadas por meio de sugestões, discussões e revisões ao longo deste trabalho.

Agradeço o Dr. Marcos Cardoso de Lima e Dr. Amílcar Careli César do Grupo de Pesquisa em Telecomunicações da Escola de Engenharia de São Carlos/USP pela oportunidade de trabalhar em conjunto.

Agradeço a minha família que soube compreender os momentos em que estive ausente, pelo apoio que sempre recebi e pelo empenho na minha formação acadêmica.

Agradeço a minha esposa Juliana que acompanhou a realização de todo este trabalho e que sempre me apoiou e, compreendeu os momentos de dificuldade.

Agradeço a Universidade Norte do Paraná (UNOPAR) pelo apoio e suporte para o desenvolvimento deste trabalho.

Sumário

Lista de Figuras	x
Lista de Tabelas	xiii
Glossário	xiv
Lista de Símbolos	xviii
Trabalhos Publicados Pelo Autor	xxi
1. Introdução.....	1
1.1. Visão geral.....	1
1.2. Contribuições da tese.....	6
1.3. Organização da tese.....	7
2. Redes ópticas	8
2.1. Introdução.....	8
2.2. Integração IP sobre WDM.....	12
2.3. Redes ópticas híbridas WDM/OCDM.....	16
2.3.1. Tecnologia de multiplexação OCDM.....	17
2.3.2. Códigos ópticos ortogonais (OOC).....	22

3. Redes OBS com roteamento por códigos ópticos e comprimentos de onda.....	27
3.1. Introdução.....	27
3.2. Arquitetura da rede.....	29
3.3. Metodologia de análise.....	32
3.4. Resultados.....	38
3.5. Sumário.....	46
4. Análise de OXCs WDM/OCDM.....	47
4.1. Introdução.....	47
4.2. OXC WDM/OCDM.....	49
4.3. Modelagem matemática.....	50
4.4. Resultados.....	55
4.5. Sumário.....	60
5. Efeitos da PMD em redes ópticas híbridas WDM/OCDM.....	61
5.1. Introdução.....	61
5.2. Restrições físicas em redes ópticas.....	62
5.2.1. Polarization mode dispersion (PMD).....	65
5.2.2. Efeitos da PMD sobre códigos OOC.....	67
5.3. Efeitos da PMD em redes ópticas WDM/OCDM.....	69
5.3.1. Metodologia de análise.....	70
5.3.2. Resultados.....	72
5.4. Efeitos da PMD em Rotas Ópticas WDM/OCDM.....	76
5.4.1. Metodologia de análise.....	77
5.4.2. Resultados.....	79

5.5. Sumário.....	84
6. Redes OBS com rótulos de códigos ópticos.....	85
6.1. Introdução.....	85
6.2. Arquitetura da rede.....	88
6.2.1. Redes comutadas por rajadas (OBS).....	88
6.2.2. Redes comutadas por rajadas (OBS) com processamento óptico...	90
6.3. Metodologia de análise.....	92
6.4. Resultados.....	97
6.5. Sumário.....	107
7. Conclusões e trabalhos futuros.....	108
7.1. Conclusões.....	108
7.2. Sugestões para trabalhos futuros.....	110
Referências bibliográficas.....	112

Lista de Figuras

Fig. 1.1. Arquitetura de rede óptica.....	2
Fig. 2.1. Evolução da arquitetura WDM de sistema de transporte de alta capacidade para redes ópticas.....	11
Fig. 2.2. Alternativas de arquiteturas de redes IP sobre WDM.....	13
Fig. 2.3. Sistema ilustrativo de codificação e decodificação OCDMA.....	19
Fig. 2.4. Processo de codificação e decodificação empregando a tecnologia OCDM (a) unipolar e (b) bipolar	20
Fig. 2.5. Esquema SIK utilizado em conjunto com os códigos OOC.....	25
Fig. 3.1. Arquitetura simplificada do roteador de borda.....	30
Fig. 3.2. Processo de agregação das rajadas e reserva de recursos.....	31
Fig. 3.3. Modelo <i>On-Off</i> de trafego de rajadas.....	33
Fig. 3.4. Taxa média de erro de bits em função do número de códigos ópticos por comprimento de onda para códigos OOC com peso 4, 5 e 6 e $\hat{\rho} = 0,5$ para cada enlace WDM/OCDM.....	38
Fig. 3.5. Probabilidade de perdas de rajadas em função da utilização do enlace, $\hat{\rho}$, para 10 e 20 códigos por comprimento de onda com peso igual a 5.....	39
Fig. 3.6. Probabilidade de perdas de rajadas em função da utilização de enlace, $\hat{\rho}$, para 10 e 20 códigos por comprimento de onda com peso igual a 4, 5 e 6.....	40
Fig. 3.7. Probabilidade de perdas de rajadas em função do número de códigos por comprimento de onda para um atraso de borda de 10, 20 and 50 ms, $1/\lambda = 4\mu\text{s}$, $t_{\text{RTP}} = 10$ ms (1000 km) e códigos com peso igual 5.....	41
Fig. 3.8. Probabilidade de perdas de rajadas em função do número de códigos por comprimento de onda para um atraso de borda de 20 ms, $1/\lambda = 4\mu\text{s}$, $t_{\text{RTP}} = 10$ ms (1000 km) e códigos com peso igual 4, 5 e 6.....	42
Fig. 3.9. Tempo de utilização, t_{util} em função do atraso dos pacotes no roteador, t_{borda}	43
Fig. 3.10. Fator de Re-Utilização de Canais (<i>FRC</i>) em função do atraso dos pacotes no roteador, t_{borda}	44
Fig. 4.1. Fig. 4.1. Arquitetura generalizada de um OXC WDM/OCDM.....	49

Fig. 4.2. BER na saída do correlacionador em função do número de códigos OOC.....	55
Fig. 4.3. PER na saída do comutador óptico em função do número de códigos OOC..	56
Fig. 4.4. PER na saída do comutador óptico em função do número de códigos OOC..	57
Fig. 4.5. Vazão (Mbps) em função do número de códigos OOC.....	58
Fig. 5.1. Distância limitada pela PMD em função do número de códigos ópticos para pesos distintos dos códigos ópticos. As taxas de transmissão são 1,0, 2,5 e 10 Gbps em (a), (b) e (c), respectivamente.....	68
Fig. 5.2. Rede óptica de alta velocidade do sul da Finlândia.....	73
Fig. 5.3. Probabilidade de bloqueio em função do número de códigos OOC.....	73
Fig. 5.4. Probabilidade de bloqueio em função do número de códigos OOC.....	75
Fig. 5.5. Probabilidade de bloqueio em função do número de códigos OOC.....	76
Fig. 5.6. PER em função do número de códigos OOC.....	79
Fig. 5.7. PER em função do número de códigos OOC.....	80
Fig. 5.8. PER em função do número de códigos OOC, $L_{Max}=30$ km.....	81
Fig. 5.9. PER em função do número de códigos OOC, $L_{Max}=60$ km.....	82
Fig. 5.10. PER em função do número de códigos OOC.....	82
Fig. 6.1. Esquema de uma rede OBS.....	86
Fig. 6.2. Modelo de roteador de borda utilizado em redes OBS.....	88
Fig. 6.3. Processo de reserva de recursos em função do tempo com processamento eletrônico dos rótulos. Empregando o protocolo de sinalização (a) JET e (b) JIT.....	89
Fig. 6.4. Processo de reserva de recursos em função do tempo com processamento óptico dos rótulos. Empregando o protocolo de sinalização (a) JET e (b) JIT.....	91
Fig. 6.5. Arquitetura interna de leitura, troca de rótulos e comutação.....	92
Fig. 6.6. Diagrama de tempo do processo de reserva empregando JIT.....	95
Fig. 6.7. Tempo de processamento em função do número de códigos OOC para taxas de transmissão de 1,0, 2,5 e 10,0 Gbps e peso igual a 3, 4 e 5.....	97
Fig. 6.8. Comprimento mínimo de rajada em função da taxa de transmissão.....	98
Fig. 6.9. Utilização da rede em função do comprimento médio das rajadas considerando o processamento óptico e eletrônico dos rótulos para taxas de transmissão de 1,0, 2,5 e 10 Gbps.....	99
Fig. 6.10. Probabilidade de perdas de rajadas em função do número de comprimento de onda para $\lambda = 16$ e 32μ para rotas com 5, 10 e 15 enlacs.....	100

Fig. 6.11. Ganho de utilização em função do número de comprimentos de onda para λ igual a 16μ e 32μ , e rotas com 5, 10 e 15 enlaces.....	103
Fig. 6.12. Probabilidade de perdas de rajadas em função do número de enlaces numa rota para o processamento eletrônico e processamento óptico.....	103
Fig. 6.13. Probabilidade de perdas de rajadas em função do comprimento médio das rajadas para uma taxa média de chegada ou solicitação de rajadas de $\lambda = 16$ e 32μ	105
Fig. 6.14. Capacidade de <i>buffer</i> em função do comprimento médio da rajada para redes OBS com processamento eletrônico. Número de enlaces 5 e 15 e taxa média de solicitação de rajadas de 16 e 32μ	106

Lista de Tabelas

Tabela 2.1. Comparação entre os Códigos Ópticos OCDM coerentes e não-coerentes.	21
Tabela 5.1. Distância máxima de transmissão devido aos efeitos da PMD sem a utilização de compensadores.....	67
Tabela 5.2. Representação da política do sistema.....	71
Tabela 6.1. Economia relativa de comprimentos de onda.....	101
Tabela 6.2. Economia relativa de comprimentos de onda.....	102

Glossário

ASON	-	<i>Automatically Switched Optical Networks</i> Redes Ópticas com Comutação Automática
ASTN	-	<i>Automatically Switched Transport Networks</i> Redes de Transporte com Comutação Automática
ATM	-	<i>Asynchronous Transfer Mode</i> Mode de Transferência Assíncrono
AWG	-	<i>Arrayed Waveguide Gratings</i> Arranjo de Guias de Onda em Rede
BER	-	<i>Bit Error Rate</i> Taxa de Erro de Bit
BPSK	-	<i>Binary Phase Shifting Keying</i> Chaveamento Binário por Mudança de Fase
BBP	-	<i>Burst Blocking Probability</i> Probabilidade de perdas de rajadas
CATV	-	<i>Community Antenna Television</i> Antena de Televisão Comunitária
CDF	-	<i>Cumulative Distribution Function</i> Distribuição de Função Cumulativa
CoS	-	<i>Class of Service</i> Classe de Serviço
CSMA/CD	-	<i>Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection</i> Acesso Múltiplo à Portadora sem Colisão
DCF	-	<i>Dispersion-Compensating Fiber</i> Fibra Compensadora de Dispersão
DGB	-	<i>Differential Group Delay</i> Atraso Diferencial de Grupo
DSF	-	<i>Dispersion Shifted Fiber</i> Fibra com Dispersão Deslocada
DWDM	-	<i>Dense Wavelength Division Multiplexing</i> Multiplexação Densa por Divisão de Comprimentos de Onda
EDFA	-	<i>Erbium Doped Fiber Amplifier</i> Amplificador a Fibra Óptica Dopada com Érbio
EO	-	<i>ElectroOptical</i> Eletroóptica

FBG	-	<i>Fiber Bragg Grating</i> Fibra com Redes de Bragg
FDL	-	<i>Fiber Delay Lines</i> Fibra Óptica de Retardo
FEC	-	<i>Forward Error Correction</i> Corretor de Erro de Encaminhamento
FLC	-	<i>Ferroelectric Liquid Crystals</i> Cristais Líquido Ferroelétricos
FRC	-	Fator de Re-utilização de Canais
FSK	-	<i>Frequency Shifting Keying</i> Chaveamento por Mudança de Frequência
FWM	-	<i>Four Wave Mixing</i> Mistura de Quatro Ondas
GA	-	<i>Genetic Algorithm</i> Algoritmo Genético
GMPLS	-	<i>Generalized Multiprotocol Label Switching</i> Comutação por Rótulo de Multiploprotocolo Generalizado
IETF	-	<i>Internet Engineering Task Force</i> Força Tarefa de Engenharia de Internet
IP	-	<i>Internet Protocol</i> Protocolo de Internet
ITU-T	-	<i>International Telecommunication Union-Telecommunication Standardization</i> União Internacional das Telecomunicações-Padronização de Telecomunicações
JET	-	<i>Just Enough Time</i> Justamente Tempo Suficiente
JIT	-	<i>Just-in-Time</i> Justamente no Tempo
LSP	-	<i>Label Switched Path</i> Caminho Comutado por Rótulo
LSR	-	<i>Label Switch Router</i> Roteador com Comutação de Rótulo
MAI	-	<i>Multiple-Access Interference</i> Interferência de Múltiplo Acesso
MAN	-	<i>Metropolitan Area Network</i> Rede de Área Metroplitana
MEMS	-	<i>Micro-Electro-Mechanical Switches</i> Micro Comutadores Eletro-Mecânico
NRZ	-	<i>Non-Return to Zero</i> Não Retorna a Zero
OADM	-	<i>Optical Add/Drop Multiplexer</i> Multiplexador Óptico de Inserção e Retirada

OBS	-	<i>Optical Burst Switching</i> Comutação Óptica por Rajadas
OBS/A	-	<i>Optical Burst Switched with Acknowledgment</i> Comutação Óptica por Rajadas com Confirmação
OCDM	-	<i>Optical Code Division Multiplexing</i> Multiplexação por Divisão de Códigos Ópticos
OCDMA	-	<i>Optical Code Division Multiple Access</i> Múltiplo Acesso por Divisão de Códigos Ópticos
OOC	-	<i>Orthogonal Optical Codes</i> Códigos Ópticos Ortogonais
OOK	-	<i>On-Off Keying</i> Chavenado Liga-Desliga
OXC	-	Crossconnects Ópticos
PER	-	<i>Packet Error Rate</i> Taxa de Erro de Pacotes
PMD	-	<i>Polarization Mode Dispersion</i> Dispersão por Polarização Modal
PN	-	<i>Pseudo-Noise</i> Pseudo Ruído
QoS	-	<i>Quality of Service</i> Qualidade de Serviço
RAM	-	<i>Random Access Memory</i> Acesso Aleatório à Memória
RCA	-	<i>Routing Channel Assignment</i> Roteamento e Atribuição de Canais
RF	-	<i>Radio Frequency</i> Rádio Frequência
RSVP	-	<i>Resource Reservation Protocol</i> Protocolo de Reserva de Recursos
RWA	-	<i>Routing and Wavelength Assignment</i> Roteamento e Atribuição de Comprimentos de Onda
SDH	-	<i>Synchronous Digital Hierarchy</i> Hierarquia Digital Síncrona
SIK	-	<i>Sequence Inversion Keyed</i> Chaveamento por Inversão de Sequência
SIR	-	<i>Signal-to-Interference Noise Ratio</i> Razão entre Sinal e Ruído de Interferência
SOA	-	<i>Semiconductor Optical Amplifier</i> Amplificador Óptico a Semicondutor
SONET	-	<i>Synchronous Optical Network</i> Rede Óptica Síncrona
SPM	-	<i>Self Phase Modulation</i> Auto Modulação de Fase

TAG	-	<i>Tell-and-Go</i> Avise e Vá
TCP	-	<i>Transfer Control Packet</i> Pacote de Controle de Transferência
TDM	-	<i>Time Division Multiplexing</i> Multiplexação por Divisão de Tempo
TGIT	-	<i>Time Gate Intensity Threshold</i> Gatilho de Tempo por Limiar de Intensidade
TW	-	<i>Traveling Waves</i> Ondas Viajantes
VOCP/VWP	-	<i>Virtual Optical Code Path/Virtual Wavelength Path</i> Caminho Óptico Virtual Baseado em Código/Caminho Óptico Virtual Baseado em Comprimento de Onda
WAN	-	<i>Wide Area Network</i> Rede de Área Ampla
WR-OBS	-	<i>Wavelength Routed - Optical Burst Switching</i> Rede Óptica Comutada por Rajadas com Roteamento por Comprimento de Onda
XPM	-	<i>Cross Phase Modulation</i> Modulação de Fase Cruzada

Lista de Símbolos

$a_l^{(j)}$	- Seqüência binária $\in \{1,0\}$
T	- Duração de bit
B	- Taxa de bit transmitida
$c_n^{(j)}$	- $n^{\text{ésimo}}$ <i>chip</i> do $j^{\text{ésimo}}$ código
c_j	- Codeword
L	- Comprimento do código
T_c	- Duração de cada <i>chip</i>
$r(\cdot)$	- Unidade de amplitude do pulso retangular
$d_k^{(j)}$	- Sinal decodificado no receptor
w	- Peso do código
λ_a	- Auto-correlação
λ_c	- Correlação-cruzada
τ	- Atraso entre duas codewords
C	- Número de códigos ópticos
P_B	- Probabilidade de erro de bit
P_{B0}	- Probabilidade de erro de bit na transmissão do bit “0”
P_{B1}	- Probabilidade de erro de bit na transmissão do bit “1”
W	- Comprimento de onda
HE_{11}^y	- Polarização vertical
HE_{11}^x	- Polarização horizontal

β_x	- Constantes de propagação do modo horizontal
β_y	- Constantes de propagação do modo vertical
τ_g	- Atraso de grupo
$\Delta\tau_g$	- Atrase por quilômetro entre as duas polarizações ortogonais
D_{PMD}	- Coeficiente de PMD
L_O	- Comprimento de cada enlace de fibra óptica
a	- Fração de duração do bit
E	- Número enlaces unidirecionais
D_g	- Vetor dimensão que representa cada indivíduo
g	- Gene
$n_1(k)$	- Número de códigos disponíveis no comprimento de onda k no enlace i
$n_2(k)$	- Número de enlaces na trajetória i que estão sendo utilizadas no comprimento de onda k
$n_3(k)$	- Número de enlaces da trajetória i que não suporta as requisições de j códigos
$n_4(k)$	- Comprimento da trajetória
$n_5(k)$	- Número de nós da trajetória i
r_n	- Pesos dos coeficientes.
T_{Offset}	- Tempo de <i>offset</i>
N	- Número de enlaces de uma rota óptica
T_{OXC}	- Tempo de configuração do OXC
T_{Setup}	- Tempo de processamento para reserva de recursos
$1/\mu$	- Comprimento (duração) da rajada
U	- Utilização da rede
$T_{Latência}$	- Latência dos pacotes na rede
T_P	- Tempo de correlação óptica de códigos ópticos
T_{Rajada}^{\min}	- Comprimento (duração) mínimo de uma rajada
λ_{OXC}	- Taxa média de chegada das rajadas num comutador óptico
λ	- Taxa média de chegada num determinado comprimento de onda
F	- Número de fibras ópticas
T_{Rajada}	- Duração da rajada transmitida.

k_c	-	Número de comprimentos de onda de controle
λ_R	-	Taxa média de chegada dos rótulos
W	-	Número de comprimentos de onda
E_W	-	Economia relativa de comprimentos de onda
$W_{Elétrônico}$	-	Número de comprimentos de onda empregando o processamento eletrônico
$W_{Óptico}$	-	Número de comprimentos de onda empregando o processamento óptico
λ_i/OOC_j	-	Canal virtual definido pelo comprimento de onda i e códigos óptico j
λ_P	-	Taxa média de chegada de pacotes
t_{borda}	-	Atraso no roteador de borda
t_{util}	-	Tempo para esvaziar o armazenador eletrônico e transmitir a rajada entre os dois roteadores de borda
t_{proc}	-	Tempo de processamento da requisição do VOCP/VWP
$t_{prop,conf}$	-	Tempo de envio do pacote de controle de confirmação
t_{transm}	-	Tempo de transmissão da rajada
t_{ocioso}	-	Tempo que o caminho virtual ficou ocioso
$t_{prop,rede}$	-	Tempo entre a confirmação e o início da chegada dos dados no roteador de borda de egresso
U_B	-	Eficiência de utilização da largura de banda dos VOCP/VWP
B_{Canal}	-	Largura de banda efetiva por caminho óptico virtual VOCP/VWP
$b_{óptica}$	-	Taxa de transmissão nos enlaces da rede óptica
K_c	-	Número de canais disponíveis num enlace de uma rede WR-OBS
λ_B	-	Taxa média de chegada de rajadas num determinado comprimento de onda
$\hat{\mu}_B$	-	Inverso da média do período de <i>On</i>
$\hat{\lambda}_B$	-	Inverso da média do período de <i>Off</i>
B_B	-	Comprimento da rajada
ρ	-	Intensidade de utilização
$\hat{\rho}$	-	Intensidade de utilização normalizada
$b_{eletrônico}$	-	Taxa agregada de pacotes de todas fontes com mesmo destino

Trabalhos Publicados Pelo Autor

1. F. R. Durand, F. Rudge Barbosa, M. F. Abbade, and E. Moschim, “Effects of Multiple Access Interference and PMD on Optical Code Lightpaths”, *IEEE Sarnoff 2007 Symposium*, paper S-13-2, Princeton NJ, USA, April 2007.
2. F. Durand, M. Abbade, F. Rudge and E. Moschim, “Analysis of Optical Burst Switching Network with Code-Based Label Processing”, *Journal of Microwaves and Optoelectronics*, vol.6, pp.111 – 126, junho de 2007.
3. F. Durand, L. Galdino, M. Abbade, E. Moschim and F. Rudge, “Performance Evaluation of Advanced WDM Networks with Optical Codes and Photonic Switching”, *International Microwave and Optoelectronics Conference – IMOC 2007 – SBMO/MTTS/IEEE*, 29 de outubro a 1 de novembro de 2007, Brasília, Brazil.
4. F. Durand, M. Abbade e E. Moschim, “Análise de Redes Ópticas Híbridas WDM/OCDM com Conversores de Códigos e Comprimentos de Onda”, *Simpósio Brasileiro de Microondas e Eletromagnetismo – MOMAG 2006*, agosto de 2006, Belo Horizonte, Brasil.
5. F. Durand, M. Abbade e E. Moschim, “Análise de Redes Ópticas OBS com Processamento Óptico de Rótulos”, *Simpósio Brasileiro de Microondas e Eletromagnetismo – MOMAG 2006*, agosto de 2006, Belo Horizonte, Brasil.
6. F. Durand, M. Abbade and E. Moschim, “Analysis of All-Optical Code Converter Placement in Hybrid WDM/OCDM Networks”, *International Conference on Telecommunication – ICT 2006*, 9 a 12 de maio de 2006, Funchal, Madeira Islands, Portugal.
7. F. Durand, M. Abbade and E. Moschim, “Performance Analysis of an Wavelength/Code Burst Switched Edge Router”, *International Conference on Telecommunication – ICT 2006*, 9 a 12 de maio de 2006, Funchal, Madeira Islands, Portugal.
8. F. Durand, M. Cardoso, A. César and E. Moschim, “Impact of PMD on Hybrid WDM/OCDM Networks”, *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 17, n. 12, pp. 2787 – 2789, dezembro de 2005.
9. F. Durand e E. Moschim, “Análise de Desempenho de Redes Ópticas Híbridas WDM/OCDM”, *Revista SEMINA Ciências Exatas e Tecnológicas (Universidade Estadual de Londrina)*, vol. 26, n. 1, pp. 41 – 52, janeiro/junho de 2005.

10. F. Durand, M. Cardoso, A. César and E. Moschim, “Effects of PMD on Hybrid WDM/OCDM Networks”, *International Microwave and Optoelectronics Conference – IMOC 2005 – SBMO/MTTS/IEEE*, 25 à 28 de julho de 2005, Brasília, Brazil.
11. F. Durand and E. Moschim, “Analysis of Hybrid WDM/OCDM Networks with All-Optical Code Converters”, *International Microwave and Optoelectronics Conference – IMOC 2005 – SBMO/MTTS/IEEE*, 25 à 28 de julho de 2005, Brasília, Brazil.
12. F. Durand and E. Moschim, “Performance Analysis of an Wavelength/Code-Routed Burst Switched Network”, *International Microwave and Optoelectronics Conference – IMOC 2005 – SBMO/MTTS/IEEE*, 25 à 28 de julho de 2005, Brasília, Brazil.
13. F. Durand e E. Moschim, “Uma Arquitetura de Rede OBS com *Labels* de Códigos Ópticos Ortogonais”, *XXII Simpósio Brasileiro de Telecomunicações – SBT 2005*, 4 a 8 de setembro de 2005, Campinas, Brasil.
14. F. Durand e E. Moschim, “Análise de Redes Ópticas WDM/OCDM”, *XXI Simpósio Brasileiro de Telecomunicações – SBT 2004*, 4 à 8 de setembro de 2004, Belém, Brasil.
15. F. Durand e E. Moschim, “Análise de Redes Ópticas GMPLS Empregando *Labels* de Comprimento de Onda e Códigos Ópticos”, *Simpósio Brasileiro de Microondas e Eletromagnetismo – MOMAG 2004*, agosto de 2004, São Paulo, Brasil.

Capítulo 1

Introdução

1.1 Visão Geral

A convergência das telecomunicações e da transmissão de dados vem causando uma mudança de paradigma na concepção de projetos e operação de redes ópticas. Para se ter uma idéia do volume dos investimentos realizados em infra-estrutura para o transporte de dados, vale lembrar que os *backbones* de Internet apresentaram um crescimento numa taxa de 30 – 40 % no ano de 2000 enquanto as redes de telefonia cresceram a uma taxa de 5 – 10 % [1.1]. Algumas estimativas mostram que a largura de banda total utilizada na Internet, que dobrava a cada seis meses ao ano no início de sua popularização [1.2], vem mantendo um crescimento exponencial, mesmo com as variações que ocorrem no cenário econômico [1.3].

O tráfego agregado total de Internet nos EUA excedia 1 Tbps no ano de 2003 [1.4] e mantendo esta taxa de crescimento, a largura de banda total requerida excedeu 280 Tbps em 2005 [1.2]. Alguns estudos indicam que a taxa de transmissão poderá chegar a 1 Pbps no ano de 2010 [1.4]. Assim, se verifica que a popularidade da Internet e a desregulamentação dos setores públicos de telefonia em muitos países foram responsáveis por este aumento de demanda por largura de banda. Adicionalmente, está ocorrendo um aumento no volume de tráfego em função do oferecimento de serviços multimídia de banda larga e expansão dos sistemas de comunicações móveis. Este crescimento rápido e global por demanda de largura de banda está acelerando o desenvolvimento e a implementação de

redes de comunicações ópticas, visto que este tipo de rede é responsável pelo transporte de grande parte do tráfego gerado nos demais sistemas de comunicações [1.5].

As redes ópticas surgiram a partir da evolução dos sistemas de transmissão que empregavam a multiplexação por divisão de comprimento de onda (*Wavelength Division Multiplexing*, WDM) e de dispositivos que efetuam a comutação e o roteamento de comprimentos de onda no domínio óptico como filtros *Add-Drop* e comutadores ópticos (*Optical Crossconnects*, OXC). Desta forma, a camada óptica passou a efetuar funções da camada de rede [1.6]. A Fig. 1.1 ilustra uma arquitetura de rede óptica que é considerada neste trabalho.

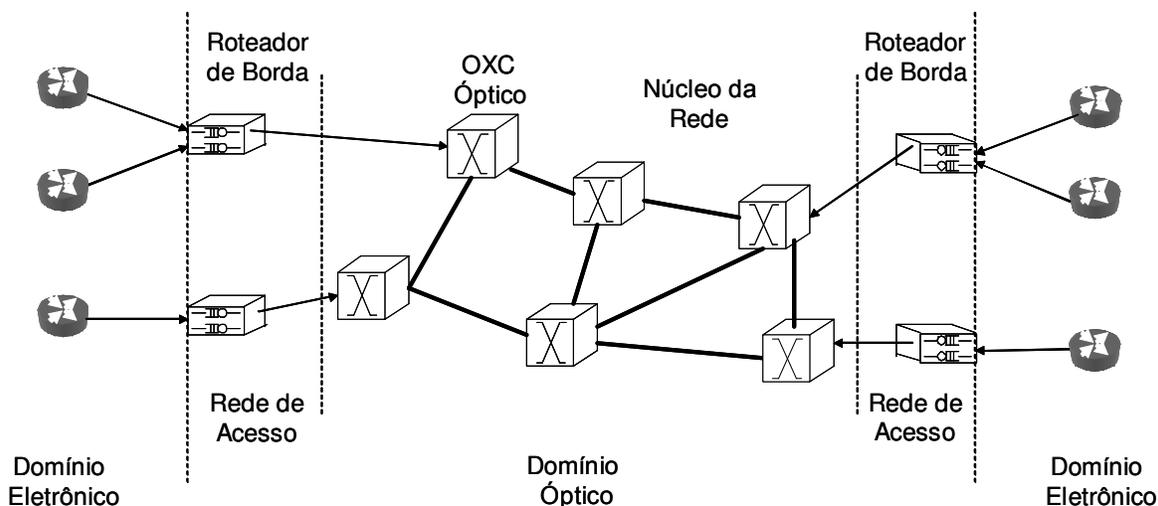


Fig. 1.1. Arquitetura de rede óptica.

Esta arquitetura é composta por roteadores de ingresso que armazenam os pacotes no formato eletrônico e transmitem de acordo com a disponibilidade de recursos da rede. Ao longo da rede óptica os OXCs do núcleo da rede são responsáveis pelo roteamento e comutação óptica. Com relação ao tipo de comutação empregada as redes ópticas podem apresentar as configurações de comutação por circuitos, rajadas (*Optical Burst Switching*, OBS) e pacotes [1.6]. As redes ópticas com comutação de circuitos empregam a tecnologia de comutação de *lightpaths* que formam a camada óptica. As mensagens são transmitidas após o estabelecimento das *lightpaths* por meio da configuração dos OXCs ao longo da rede. A duração da conexão é longa e a utilização de largura de banda é baixa, pois não é

empregada multiplexação estatística. Por outro lado, as redes ópticas de rajadas e de pacotes apresentam outro princípio de funcionamento. Nestas redes são transmitidos pacotes no domínio óptico ocupando largura de banda somente durante o envio do pacote. Isto implica num maior aproveitamento de largura de banda em função da multiplexação estatística [1.7]. Apesar de modelos utilizados em laboratórios apresentarem um bom desempenho, estas redes ainda possuem um custo muito elevado. Como ainda não é possível fazer o processamento óptico do sinal de forma eficaz emprega-se a divisão do sinal em cabeçalho e informação transmitida (*payload*). Assim, quando chega num nó o cabeçalho é processado no domínio eletrônico enquanto o *payload* é atrasado por meio de fibras ópticas de retardo (*Fiber Delay Lines*, FDL) [1.4] e depois é comutado para o destino determinado pelo cabeçalho. A principal diferença entre a rede de rajadas e de pacotes é que a rede de rajadas agrega vários pacotes de tamanhos variáveis com mesmo destino em um único cabeçalho que é transmitido em um comprimento de onda separado para efetuar a reserva de recursos. Já a rede de pacotes emprega um cabeçalho para cada pacote e o pacote de informação e o cabeçalho são transmitidos no mesmo comprimento de onda.

Mesmo ocorrendo uma grande evolução dos dispositivos utilizados em redes ópticas e a consolidação da camada WDM como tecnologia de transporte, ainda existem algumas restrições como o número limitado de comprimentos de onda disponíveis na faixa de ganho dos amplificadores a fibra óptica dopada com érbio (*Erbium Doped Fiber Amplifier*, EDFA) e a baixa eficiência espectral que ocorre em função da granularidade limitada a um comprimento de onda apresentada pela tecnologia WDM [1.8][1.9][1.10]. Esta limitação de granularidade ocorre em função da utilização da tecnologia de comutação baseada em circuitos, visto que as características de tráfego determinam o emprego de redes baseadas na tecnologia de comutação de pacotes para a obtenção de uma utilização elevada das redes ópticas. Entretanto se verifica que o atual estágio tecnológico não permite a utilização de redes com esta tecnologia de comutação em função da limitação de armazenamento de informações empregando FDL [1.9].

O aumento do tráfego gerado pela Internet tornou o Protocolo de Internet (IP) dominante nas redes de dados e também o consolidou como elemento de convergência com as telecomunicações. Desta forma, se a tendência de crescimento do tráfego deste protocolo for mantida, o seu transporte constituirá o principal tipo de serviço das redes ópticas.

Portanto, é natural que sejam concebidas arquiteturas de redes que otimizem o seu transporte [1.8]. Neste contexto se verifica que no cenário atual mais de 50 % do tráfego consiste de pacotes IP com menos de 522 bytes e 50 % destes pacotes possuem de 40 a 44 bytes [1.5]. Desta forma, as redes ópticas que utilizam a comutação tanto por rajadas como por pacotes são as alternativas naturais para este tipo de tráfego, pois estas redes apresentam a multiplexação estatística como forma de aumentar a utilização da rede. Por outro lado, o emprego de muitos protocolos no transporte de pequenos pacotes diminui a eficiência da rede. Em virtude do aumento das funcionalidades de rede da camada óptica observa-se que a pilha de protocolos entre o protocolo IP e a camada óptica WDM está sendo eliminada [1.7]. Desta maneira, a integração do IP sobre WDM pode ser realizada pela comutação de rótulos multiprotocolos generalizados (*Generalized Multiprotocol Label Switching*, GMPLS) proposto pela força tarefa de engenharia de Internet (*Internet Engineering Task Force*, IETF) [1.8], sendo a comutação e o roteamento realizados por meio das informações provenientes dos rótulos ópticos, que no atual estágio de desenvolvimento são compostos pelos comprimentos de onda [1.9].

O emprego de redes OBS [1.11] vem se apresentando como uma excelente solução em termos de viabilidade tecnológica e eficiência de utilização, porém apresenta limitações quando o tráfego transmitido se caracteriza por ser composto por pacotes de pequeno comprimento em função do tempo empregado no processamento e na reserva de recursos da rede. Neste trabalho também se considera as redes ópticas comutadas por rajadas e roteadas por comprimento de onda (*Wavelength Routed – Optical Burst Switched*, WR-OBS) [1.12]. Este tipo de rede apresenta comutação de circuito, porém o tempo de estabelecimento e duração das *lightpaths* é de poucos milisegundos.

Uma alternativa para expandir a capacidade das redes ópticas e transpor algumas de suas limitações tecnológicas é a utilização de códigos ópticos da tecnologia de multiplexação por divisão de códigos ópticos (*Optical Code Division Multiplexing*, OCDM) [1.13], principalmente em função da utilização do processamento óptico das informações transmitidas e recebidas. Desta forma, a utilização da tecnologia híbrida WDM/OCDM como camada de transporte pode aumentar a flexibilidade e granularidade das redes ópticas comutadas por circuitos e WR-OBS, além de possibilitar a utilização dos comprimentos de onda e códigos ópticos como rótulos ópticos para o esquema GMPLS

[1.14]. Por outro lado, observa-se que foco de estudo das redes híbridas WDM/OCDM tem sido ampliado das redes locais e de acesso para as redes de transporte de médio e grande porte. Desta forma, o estudo das restrições físicas, principalmente os efeitos da polarização por dispersão modal (*Polarization Mode Dispersion*, PMD) [1.15] sobre o desempenho da rede é de extrema importância para o projeto e análise de uma rede óptica. A PMD apresenta dificuldade de compensação e consiste de uma das principais limitações das redes ópticas com elevada taxa de transmissão [1.16]. Além do estudo das restrições físicas, verifica-se que o desenvolvimento e análise de dispositivos ópticos para o emprego em redes WDM/OCDM é de grande importância, pois o desenvolvimento destes dispositivos ainda se encontra em uma fase inicial de propostas e maturação tecnológica para a aplicação em experimentos.

Os códigos ópticos podem ser classificados como coerentes e não-coerentes. A principal diferença é que nos códigos não-coerentes empregam-se códigos ópticos unipolares que são obtidos por modulação em intensidade, já nos sistemas coerentes empregam-se códigos ópticos bipolares que são obtidos por modulação de amplitude e fase. Apesar dos códigos bipolares apresentarem um desempenho mais robusto que os códigos unipolares, os códigos unipolares apresentam simplicidade de implementação em comparação com os códigos bipolares [1.13][1.14].

Outra aplicação dos códigos ópticos em redes ópticas é na forma de pacotes de controle e sinalização empregada em redes OBS para a realização da reserva de recursos por meio de processamento óptico dos códigos. Este tipo de processamento aumenta o desempenho e a utilização da rede, porém os resultados encontrados na literatura ainda empregam códigos ópticos coerentes que são de difícil implementação [1.14].

Neste contexto, o objetivo geral deste trabalho é propor e analisar aplicações de redes híbridas WDM/OCDM que utilizam códigos ópticos ortogonais (*Orthogonal Optical Code*, OOC) [1.17] em conjunto com comprimentos de onda como camada de transporte, bem como explorar a sua aplicação em redes OBS. Os códigos ópticos OOC foram escolhidos em virtude de sua simplicidade de implementação, e também pelo constante desenvolvimento que vêm apresentando [1.18][1.19]. Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Propor e analisar a utilização da tecnologia WDM/OCDM como camada de transporte em redes WR-OBS.
- Modelar os OXCs WDM/OCDM utilizados no núcleo da rede.
- Estudo dos efeitos da PMD na camada de transporte WDM/OCDM.
- Proposta e análise da utilização de códigos OOC na sinalização de redes OBS.

1.2. Contribuições da Tese

As principais contribuições desta tese são ilustradas neste trabalho da seguinte forma:

Capítulo 3: Neste capítulo a contribuição desta tese é a proposta e a análise da utilização da tecnologia WDM/OCDM como camada de transporte para redes WR-OBS. O objetivo é aumentar a eficiência de utilização e reduzir a latência das rajadas na rede, principalmente para rajadas com tempo de duração comparável ao tempo de comutação, que neste caso é determinado pelo tempo de ajuste dos OXCs e o tempo de reserva de comprimentos de onda.

Capítulo 4: Neste capítulo a contribuição da tese é um estudo da utilização de comutadores ópticos (OXC) WDM/OCDM que comutam comprimentos de onda e códigos ópticos. Este estudo é baseado no desenvolvimento de um modelo matemático do OXC WDM/OCDM considerando o desempenho do OXC em função dos parâmetros dos códigos OOC.

Capítulo 5: Neste capítulo a contribuição da tese é um estudo sobre os efeitos da PMD em redes híbridas WDM/OCDM. Este estudo é realizado tanto por meio da análise do desempenho global da rede baseado no roteamento e atribuição de caminhos ópticos definidos por comprimentos de onda e códigos ópticos, por outro lado é proposto um modelo analítico para análise dos efeitos da PMD em rotas ópticas WDM/OCDM.

Capítulo 6: Neste capítulo a contribuição desta tese é a proposta de uma arquitetura de rede OBS baseada no processamento óptico de rótulos compostos por códigos OOC. Esta arquitetura utiliza a sinalização de reserva de recursos empregando o protocolo JIT (*Just-in-Time*) que apresenta maior viabilidade de implementação e também resultados precisos quando se empregam modelos analíticos para a análise de desempenho da rede.

1.2. Organização da Tese

Com intuito de apresentar o conteúdo de forma clara e acessível, esta tese está organizada da seguinte forma. No Capítulo 2, são analisadas as principais características das redes ópticas WDM e redes ópticas híbridas WDM/OCDM. Assim, ilustram-se os tipos de códigos ópticos utilizados e suas principais características; em particular serão analisados os códigos OOC em virtude de sua utilização neste trabalho. No Capítulo 3, são ilustradas as principais características das Redes Ópticas Comutadas por Rajadas Roteadas por Códigos Ópticos e Comprimentos de Onda. No Capítulo 4 é realizada uma análise de OXCs WDM/OCDM e o desenvolvimento de um modelo matemático do OXC WDM/OCDM considerando o desempenho do OXC em função dos parâmetros dos códigos OOC. No Capítulo 5, ilustra-se um estudo sobre os efeitos da PMD em redes híbridas WDM/OCDM tanto por meio de simulação como de forma analítica. No Capítulo 6, são estudadas as Redes Ópticas Comutadas por Rajadas com Rótulos de Códigos Ópticos e ilustrada uma arquitetura de rede OBS baseada no processamento óptico de rótulos compostos por códigos OOC. Finalmente, no Capítulo 7 são apresentadas as principais conclusões obtidas neste trabalho e são listadas as possibilidades de continuidade para o desenvolvimento de trabalhos futuros baseados nos resultados apresentados nesta tese.

Capítulo 2

Redes Ópticas

Neste capítulo são analisadas as principais características das redes ópticas WDM e redes ópticas híbridas WDM/OCDM. Nesta análise, será ilustrada a evolução das redes ópticas WDM e as técnicas empregadas de integração entre o protocolo IP e as redes WDM. Por outro lado, também serão apresentadas as características da técnica OCDM e investigados os tipos de códigos ópticos utilizados. Especificamente serão analisados os códigos ópticos ortogonais (OOC) em virtude de sua utilização neste trabalho.

2.1 Introdução

As redes de comunicações ópticas são baseadas na tecnologia das fibras ópticas, a qual se tornou comercial no final da década de 1970 quando passou a ser empregada na indústria de telecomunicações, em redes de dados e em televisão a cabo (*Community Antenna Television*, CATV) [2.1]. As fibras ópticas caracterizam-se por fornecer elevadíssima largura de banda, baixas perdas de transmissão, imunidade à interferência eletromagnética e segurança no transporte de informações [2.1]. Desde o início das aplicações comerciais dos sistemas de comunicações ópticas busca-se exaurir a largura de banda localizada na faixa de comprimentos de onda de 1300 a 1600 nm das fibras monomodo [2.2]. A maneira mais eficiente de se beneficiar desta largura de banda consiste

na utilização de vários comprimentos de onda dentro de uma mesma fibra por meio da multiplexação WDM [2.3]. O desenvolvimento de amplificadores ópticos EDFA no início da década de 1990 motivou a consolidação dos sistemas de transporte empregando a tecnologia WDM [2.2]. O EDFA é composto de uma fibra óptica de sílica com núcleo dopado com átomos ionizados de érbio, Er^{3+} . O desenvolvimento dos amplificadores EDFA e a evolução dos dispositivos ópticos passivos deram origem no início da década de 1990 à primeira geração de sistemas WDM comerciais. Estes sistemas comportavam de 2 a 4 canais ópticos com espaçamento de 3 a 5 nm. No final da década de 1990, o desenvolvimento de dispositivos cada vez mais seletivos em comprimento de onda diminuiu a separação entre os canais ópticos. Isto implicou no surgimento de sistemas comerciais WDM que comportam maior número de canais, tais como 8, 16 e 40 canais, entre outros. Convencionou-se que sistemas WDM com número de canais superior a 16 receberiam a denominação de sistemas WDM denso – DWDM. O estado da arte dos sistemas DWDM no ano de 2002 eram sistemas compostos por 64 canais operando nos comprimentos de onda da banda C (1535 – 1565 nm) com comprimento de onda central de 1550 nm [2.4]. Nestes sistemas os canais estão igualmente separados em 100 GHz. Esta faixa de comprimentos de onda caracteriza-se por concentrar a faixa de ganho dos amplificadores ópticos EDFA e a faixa de comprimentos de onda de menor atenuação da sílica. O espaçamento atual de sistemas DWDM foi proposto pela União Internacional de Telecomunicações (*International Telecommunication Union*, ITU). O sistema proposto consiste de 81 canais operando na banda C com comprimento de onda central de 1552,52 nm e canais igualmente separados em 50 GHz [2.5]. Na literatura científica foram relatados experimentos com sistemas DWDM que comportam mais de 256 canais transmitindo uma taxa agregada de 10 Tbps [2.6]. Os aspectos evolutivos dos sistemas de transmissão WDM passaram pelas seguintes etapas, conforme ilustra a Fig. 2.1 [2.7]: Inicialmente os sistemas WDM eram empregados em enlaces ponto-a-ponto e o objetivo principal era aumentar a largura de banda. Este tipo de sistema se apresentava como uma alternativa à instalação de novas fibras. Porém, tornou-se necessário a manipulação no domínio óptico de parte do tráfego transmitido em pontos intermediários dos enlaces ponto-a-ponto. Desta forma, foram agregados ao enlace os multiplexadores de adição e retirada de comprimento de onda (*Optical Add/Drop Multiplexer*, OADM) [2.3]. Estes dispositivos podem inserir ou retirar

informações contidas em certos comprimentos de onda. Os primeiros OADMs empregavam a configuração estática, ou seja, retiravam e adicionavam comprimentos de onda pré-determinados. Entretanto, ocorreu o desenvolvimento de OADMs dinâmicos que podiam ter os comprimentos de onda de retirada e inserção configurados de forma dinâmica [2.8]. Após a evolução dos OADMs e buscando aumentar a flexibilidade de redes WDM multipontos foram desenvolvidos os OXCs. Os OXCs possuem o funcionamento similar aos OADMs diferenciando-se principalmente no número de fibras que entram e saem do dispositivo. A função do OXC é conectar qualquer comprimento de onda que chega em umas das portas de entrada com outra interface de saída do dispositivo. A escolha da porta de saída é realizada pelo controle da rede. A tecnologia que vem apresentando melhor desempenho na fabricação dos comutadores ópticos que compõem os OXCs é a tecnologia dos MEMS (*Micro-Electro-Mechanical Switches*) [2.9]. Os MEMs consistem de um conjunto de pequenos espelhos que alteram o ângulo de reflexão da luz de acordo com o sinal de controle elétrico. Atualmente, existem OXCs baseados em MEMs com capacidade de comutação de 256 comprimentos de onda [2.10]. Outras tecnologias que são utilizadas tanto em OADMs como em OXCs são os cristais líquidos ferroelétricos FLC (*Ferroelectric Liquid Crystals*), redes de arranjo de guia de onda AWG (*Arrayed Waveguide Gratings*) e redes de Bragg em fibra FBG (*Fiber Bragg Grating*) [2.9][2.11]. Uma boa revisão sobre as principais tecnologias empregadas nas redes WDM pode ser encontrada em [2.11].

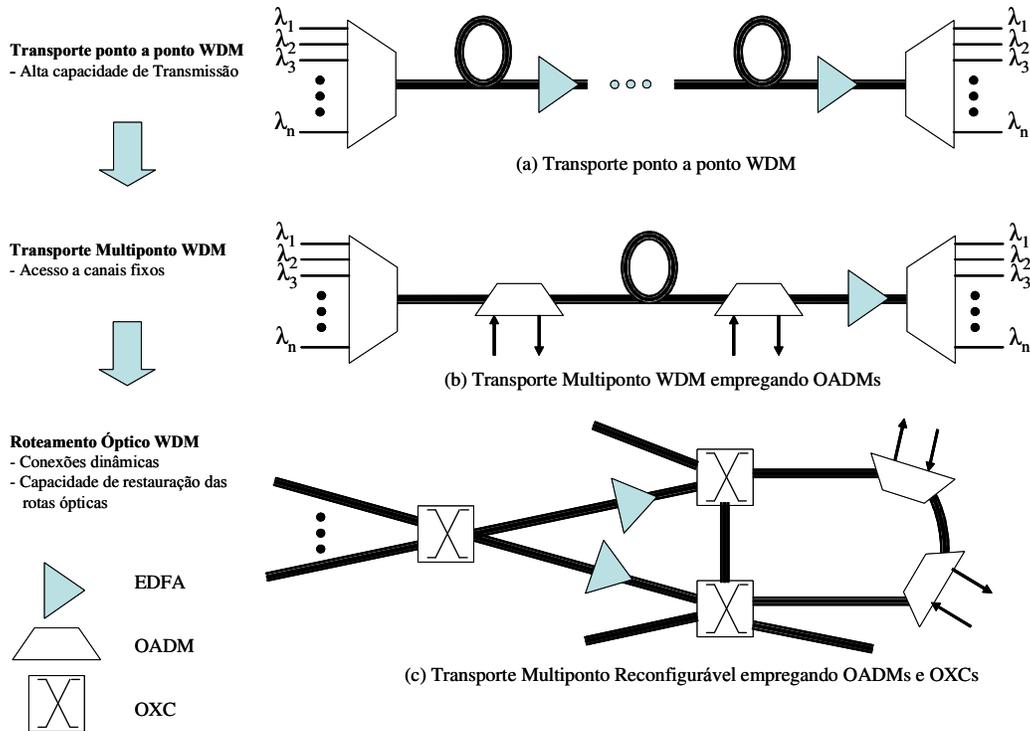


Fig. 2.1. Evolução da arquitetura WDM de sistema de transporte de alta capacidade para redes ópticas.

A evolução dos sistemas WDM ponto-a-ponto para redes WDM reconfiguráveis resultou na realização de funcionalidades como comutação e roteamento no domínio óptico. As redes com estas características também podem ser denominadas redes de Terceira Geração [2.12]. Estas redes, com a evolução e amadurecimento dos dispositivos ópticos, se desenvolveram de formas distintas para atender as necessidades de aplicação. Desta forma as arquiteturas de redes ópticas podem ser divididas em três classes [2.7]: redes de difusão e seleção, redes roteadas por comprimento de onda e redes ópticas lineares. As redes de difusão e seleção consistem de um acoplador em estrela passiva conectando todos os nós da rede. Cada nó da rede é ligado à estrela passiva por meio de um par de fibras e é equipado com um ou mais transmissores e receptores ópticos. Os nós transmitem informação em diferentes comprimentos de onda simultaneamente e a estrela recebe todas as mensagens e as distribui para todos os nós. O receptor seleciona a informação que deseja receber por meio da seleção do comprimento de onda recebido. As redes roteadas por comprimento de onda consistem de OXCs interconectados por enlaces ponto-a-ponto numa topologia lógica

arbitrária e dinâmica. Neste tipo de rede, a informação é transmitida de um nó para outro por meio de caminhos ópticos, denominados *lightpaths*, sem nenhuma conversão eletro-óptica e armazenamento de informação nos nós. Finalmente, as redes ópticas lineares utilizam a multiplexação de vários comprimentos de onda numa *waveband*. Assim, as funções de roteamento, comutação e multiplexação/demultiplexação são seletivas em *wavebands*, portanto os comprimentos de onda individuais são separados nos nós receptores. A vantagem deste tipo de rede é que o número de comutadores nos nós ópticos passa a ser igual ao número de *wavebands*, ao invés do número de comprimentos de onda. Desta forma, ocorre uma redução do custo dos OXCs e da complexidade de controle. As redes ópticas do tipo difusão e seleção são empregadas em redes locais e redes de acesso. Por outro lado, as redes roteadas por comprimento de onda são utilizadas como rede de transporte. No entanto, o aumento do número de comprimentos de onda tem motivado o desenvolvimento de redes do tipo linear para diminuir a complexidade construtiva e de controle dos OXCs [2.13].

2.2 Integração IP sobre WDM

Atualmente, a grande maioria das redes ópticas instaladas são as redes opacas, onde a conexão fim-a-fim entre dois nós ou usuários não é totalmente óptica. Isto significa que na rota deste sinal ocorre a conversão eletroóptica (EO) em nós intermediários. Esta operação de conversão afeta as taxas de transmissão das redes e consiste num gargalo de rede. A principal vantagem das redes totalmente ópticas é a possibilidade de efetuar as operações de roteamento e comutação no domínio óptico. Desta forma, não é preciso empregar dispositivos eletrônicos de alta velocidade e com alto custo [2.11]. Outra característica importante obtida é a transparência na manipulação do sinal, ou seja, a manipulação do sinal independe do formato dos protocolos e taxas de transmissão. Já é possível obter certo grau de transparência das redes ópticas, que permite que diferentes tipos de fluxos de dados trafeguem pela rede simultaneamente. Assim, os canais de uma rede WDM podem transportar tanto fluxos no formato da Hierarquia Digital Síncrona, (*Synchronous Optical Network/ Synchronous Digital Hierarchy*, SONET/SDH), Modo de Transferência

Assíncrona, (*Asynchronous Transfer Mode*, ATM), ou outros padrões como Ethernet [2.8]. O tráfego de IP em redes WDM vem sendo realizado por meio de pilhas de protocolos como IP sobre ATM sobre SONET/SDH sobre WDM, ou IP sobre SONET/SDH sobre WDM. Porém a crescente demanda de tráfego tem requerido cada vez mais taxas de transmissão maiores e isto é observado pelo maior emprego de interfaces OC-48 (2,488 Gbps) e ainda, pelo fato de serem requeridas velocidades maiores [2.13]. A Fig 2.2 ilustra as alternativas de arquiteturas de transporte de IP sobre WDM que já foram exploradas e a mais recente proposta de integração IP sobre WDM utilizando o GMPLS [2.14].

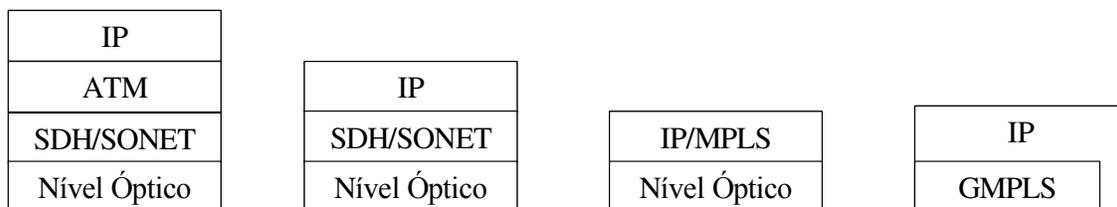


Fig. 2.2. Alternativas de arquiteturas de redes IP sobre WDM.

As redes IP/WDM consistem de nós interconectados por enlaces ópticos WDM, onde os nós ópticos seriam compostos por OXCs e elementos de processamento eletrônico como roteadores IP. Esta integração resulta em um plano de controle e um plano físico ou de encaminhamento. Com relação à integração entre estes planos as redes IP/WDM podem apresentar três modelos [2.14]: *overlay*, *peer* e *augmented*. No modelo *overlay* as funções de roteamento, descoberta e distribuição de informações sobre a topologia e protocolos de sinalização são independentes entre as camadas IP e WDM. Neste modelo existe a relação cliente-servidor entre as camadas IP e WDM. Assim ocorre uma sobreposição de funções [2.15]. No modelo *peer* a camada IP atua como parceira dos OXC. Desta forma emprega-se um endereçamento IP comum, que pode ser empregado tanto pela camada IP como pela WDM e se utiliza protocolos em conjunto para roteamento, descoberta e distribuição de informações sobre a topologia e sinalização [2.15]. Por outro lado, o modelo *augmented* é uma forma intermediária dos modelos *overlay* e *peer*. Neste modelo existe o roteamento separado entre os domínios IP e WDM, porém as informações de controle são compartilhadas [2.14]. Do ponto de vista operacional o modelo *peer* apresenta a vantagem de unificar o plano de controle, simplificar funções de roteamento e sinalização, facilitando

o emprego de tecnologias para efetuar engenharia de tráfego [2.14]. Os estudos para a padronização do plano de controle vêm sendo realizados por vários organismos de padronização, como a ITU que recomenda a utilização do padrão de rede de transporte comutada automaticamente (*Automatic Switched Transport Network*, ASTN) [2.16] e a IETF que recomenda a utilização do padrão GMPLS [2.17]. O padrão ASTN é baseado em redes ópticas comutadas automaticamente (*Automatically Switched Optical Networks*, ASON) que é uma rede óptica de transporte com configuração automática de conexão realizada pelo seu plano de controle. Maiores informações sobre ASON podem ser encontradas em [2.16]. Por outro lado, a premissa do GMPLS [2.17] é a idéia que o rótulo pode ser generalizado para qualquer forma que possa identificar um fluxo de tráfego de dados. No caso da tecnologia WDM atual, o rótulo pelo qual o sinal transmitido será roteado e encaminhado é o próprio comprimento de onda que transporta o sinal. Entretanto, alguma representação do valor do rótulo é necessária para que os protocolos de sinalização que controlam a transmissão entre os roteadores com comutação por rótulos LSR (*Label Switch Router*) concordem com o valor do rótulo que será utilizado. Para contornar esta situação o GMPLS estende um rótulo Generalizado RSVP (*Resource Reservation Protocol*) e um rótulo Generalizado TLV CR-LDP (*Constraint-Based Routing Label-Distributed Protocol*) para carregarem as informações necessárias para definição de rótulo [2.17].

A separação da informação de encaminhamento (rótulo) do conteúdo do cabeçalho IP permite à tecnologia GMPLS utilizar dispositivos como OXCs para roteamento do sinal óptico sem a necessidade da conversão EO e processamento eletrônico da informação. Desta forma, evita-se o “gargalo eletrônico” do sinal. A comutação por rótulos aumenta significativamente o desempenho da rede óptica [2.18][2.19], porém cada técnica empregada na codificação dos rótulos apresenta suas particularidades. Apesar de várias técnicas serem investigadas para a obtenção de rótulos verifica-se que a incorporação de um rótulo no sinal transmitido pode ocorrer, principalmente de quatro formas [2.20][2.21]: *slot* de tempo, comprimento de onda, subportadora de frequência de rádio (*Radio Frequency*, RF) e código óptico.

Para apresentar um bom desempenho uma rede óptica comutada por rótulos deve apresentar as seguintes características: Não consumir recursos da rede destinados à transmissão de dados, a troca de rótulos deve ser realizada de maneira simples e no domínio

óptico e, finalmente, os rótulos devem ser imunes ao acúmulo de distorções provenientes de dispersão, *jitter* e interferência de outros rótulos [2.20].

Na codificação de rótulos empregando *slot* de tempo a informação contida no rótulo está no domínio do tempo e precede o cabeçalho de um pacote ou de grupos de pacotes num mesmo comprimento de onda. Neste esquema de rótulos empregam-se intervalos de tempo para separar o rótulo da informação transmitida e também para obter sincronismo [2.22]. A vantagem de se empregar esta técnica é o envio das informações e o rótulo num mesmo comprimento de onda e a principal desvantagem é a necessidade de sincronismo. Para superar as complexidades emprega-se uma taxa menor de transmissão dos rótulos similar ao projeto de rede de pacotes KEOPS, onde a taxa de transmissão dos pacotes de informação é de 10 Gbps e dos rótulos é de, por exemplo, 622 Mbps [2.23].

Na codificação de rótulos empregando comprimentos de onda são utilizados comprimentos de onda para a comutação e o roteamento ao longo da rede óptica. Desta forma, os comprimentos de onda comportam-se como túneis para os pacotes que serão transmitidos [2.3]. A desvantagem é que a granularidade é limitada à unidade de comprimentos de onda e o número de comprimentos de onda é um recurso limitado [2.12].

Na codificação de rótulo empregando subportadora a informação do rótulo é modulada em uma portadora de radiofrequência. Por exemplo, no projeto HORNET [2.24], apesar de não empregar o GMPLS, os pacotes de dados são transmitidos numa taxa de transmissão de 2,5 Gbps e as informações do rótulo modulam no formato chaveamento por mudança de frequência (*Frequency Shifting Keying*, FSK) uma portadora de RF na frequência de 3 GHz [2.24]. Este método vem sendo largamente empregado, pois não ocupa largura de banda destinada ao tráfego de dados e também apresenta transparência, pois a taxa de transmissão do rótulo e a modulação independe da taxa de transmissão de dados. Como desvantagem deste método se observam os efeitos da dispersão e não-linearidades sobre os canais de radiofrequência que podem causar desvanecimento e intermodulação [2.25].

Na codificação de códigos empregando o OCDM a informação transmitida é mapeada por meio de um código óptico que representa o rótulo. Ao longo da rede este rótulo é processado na forma de correlação óptica para realizar as funções de comutação e roteamento das informações [2.26]. Assim, a principal vantagem deste método é a

possibilidade da utilização do processamento óptico. Por outro lado, existe a desvantagem da aplicação da tecnologia OCDM em redes de transporte ser recente.

De uma forma geral, os métodos de codificação de rótulos apresentam algumas vantagens e desvantagens, porém novos progressos na técnica OCDM estão abrindo uma nova perspectiva para a utilização de códigos ópticos como rótulos. O principal progresso desta técnica é a eliminação de operações lógicas no caso do processamento dos códigos ópticos que requerem somente correlação óptica. Portanto, os roteadores ópticos podem ser implementados empregando somente dispositivos passivos, eliminando algumas dificuldades que existem no processamento de pacotes no domínio óptico como tempo de sincronização, resolução de contenda, falta de armazenamento óptico. [2.26].

2.3 Redes Ópticas Híbridas WDM/OCDM

As redes ópticas híbridas WDM/OCDM são redes ópticas nas quais a camada de transporte é composta por caminhos ópticos virtuais baseados em código e comprimento de onda (*Virtual Optical Code Path/Virtual Wavelength Path*, VOCP/VWP) [2.26][2.27]. Este tipo de rede surgiu em função das limitações apresentadas por redes ópticas que utilizam comprimentos de onda da camada WDM como tecnologia de transporte. A limitação do número de comprimentos de onda ocorre em função das não-linearidades das fibras ópticas [2.28] e baixa seletividade dos dispositivos ópticos empregados, pois a ampliação do número de canais por meio da diminuição do espaçamento esbarra no limite imposto pela estabilidade das fontes ópticas [2.29] e *crosstalk* gerado pelos filtros ópticos [2.30]. A granularidade é limitada à largura de banda de um comprimento de onda. Esta largura de banda é elevada para algumas aplicações entre nós ópticos. A alternativa explorada para aumentar o número de canais é utilizar outros graus de liberdade como tempo, espaço, polarização ou códigos ópticos. O emprego de códigos ópticos se apresenta como uma alternativa atrativa, principalmente em função da utilização do processamento óptico das informações transmitidas e recebidas [2.26]. Neste contexto, a utilização da tecnologia híbrida WDM/OCDM como camada de transporte pode aumentar a flexibilidade e granularidade das redes ópticas. Outro fator que vem despertando o interesse na

investigação das redes ópticas híbridas WDM/OCDM é a utilização dos comprimentos de onda e códigos ópticos como rótulos por meio do GMPLS, tanto para redes com comutação por circuitos como para rajadas e pacotes [2.31].

2.3.1 Tecnologia de Multiplexação OCDM

A tecnologia de multiplexação OCDM investigada neste trabalho para aplicações na camada de transporte e de rajadas, provém da tecnologia de acesso múltiplo por divisão de códigos ópticos (*Optical Code Division Multiple Access, OCDMA*) utilizada em redes ópticas de acesso. A tecnologia OCDMA teve seu desenvolvimento motivado pela possibilidade da obtenção de capacidade de acesso assíncrono e segurança na transmissão de informação [2.32], além da realização de uma rede sem a necessidade de controle centralizado [2.33]. Outra importante motivação é a utilização da codificação e decodificação no domínio óptico. Assim podem-se obter redes totalmente ópticas que potencialmente alcancem uma taxa de transmissão agregada de Tbps [2.34]. Nesta tecnologia mapeiam-se informações que estão no domínio elétrico em seqüências de pulsos ópticos que são transmitidos em altas taxas. Estas seqüências de pulsos ópticos representam uma assinatura denominada *codeword*, na qual cada usuário da rede OCDMA possui uma assinatura distinta e somente o receptor que possuir a mesma assinatura conseguirá decodificar a informação. Esta técnica de acesso provém das técnicas de comunicação de rádio *Spread Spectrum* desenvolvidas a partir da década de 1950 [2.35]. O seu desenvolvimento decorreu da necessidade de técnicas seguras de transmissão empregadas em aplicações militares e também em função das restrições de largura de banda dos sistemas de rádio [2.36].

As primeiras pesquisas na área de OCDMA foram realizadas no final da década de 1970. Nestas investigações estudou-se o emprego de FDL para processamento óptico de sinal [2.32]. Esta investigação foi precursora dos sistemas OCDMA que empregam esquemas de fibras FDL para codificar e decodificar as informações transmitidas. Na década de 1980 foram desenvolvidas outras investigações precursoras em OCDMA. Em [2.37] ilustram-se as vantagens de se utilizar o OCDMA em redes locais em função das

características como acesso assíncrono, facilidade de adicionar novos usuários na rede e não necessidade do emprego de técnicas de controle como CSMA/CD (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection*). Porém, a principal contribuição foi a aplicação do processamento óptico utilizando fibras de retardo para a codificação dos códigos ópticos de forma não-coerente. A partir deste princípio obteve-se uma elevada capacidade de processamento óptico comparado a sistemas que utilizavam a codificação CDMA no formato eletrônico [2.38] e utilizavam a fibra óptica somente como meio de transmissão com elevada largura de banda. Em [2.37], também se verificou que a utilização de códigos Gold bipolares não era eficiente para aplicações em sistemas OCDMA não-coerentes e assim foram propostos novos códigos ópticos baseados em números primos. Com relação ao desempenho, verificou-se que para uma probabilidade de erro de bit, BER (*Bit Error Rate*) de 10^{-8} , o sistema com processamento óptico suportava até 26 usuários, enquanto o sistema com processamento eletrônico suportava no máximo 2 usuários [2.37]. Na investigação desenvolvida em [2.50] havia o objetivo de empregar novos códigos ópticos eficientes para aplicações em sistemas OCDMA. Os códigos propostos para utilização eram os códigos OOC [2.40]. Estes códigos consistiam numa seqüência de $\{1,0\}$ que apresentavam boas características de correlação. Posteriormente, os códigos OOC serão descritos e analisados. Em [2.50] também foram apresentadas as técnicas de análise de desempenho dos sistemas OCDMA considerando parâmetros como número de usuários, taxa de transmissão e características dos códigos OOC. Outra contribuição importante foi a proposta da utilização da técnica da recepção com limitação abrupta (*hard limiter*), esta técnica diminui a BER e por conseqüência proporciona um maior número de usuários na rede óptica.

Com relação à transmissão, nos sistemas OCDMA cada bit transmitido é dividido em n períodos de tempo denominados *chips* e uma seqüência de *chips* forma uma assinatura denominada *codeword*, na qual cada usuário da rede OCDMA possui uma assinatura distinta. Desta forma, todos os bits “1” a serem transmitidos são codificados no formato da assinatura e os bits “0” não são codificados. Na assinatura denomina-se o comprimento do código, o número total de *chips*, e o peso do código que é dado pelo número de *chips* ativos, ou seja com valor “1”. O sinal codificado é transmitido para todos os nós da rede e somente o usuário que possui uma cópia da assinatura transmitida conseguirá decodificar a

informação transmitida. A fonte dominante de ruído neste sistema é o *crosstalk* entre os usuários que ocorre principalmente pela interferência de acesso múltiplo MAI (*Multiple-Access Interference*) [2.40]. A Fig. 2.3 ilustra de forma representativa o processo de codificação e decodificação do sistema OCDMA com códigos compostos por seqüências de $\{1,0\}$ considerando mais de um código alcançando o decodificador.

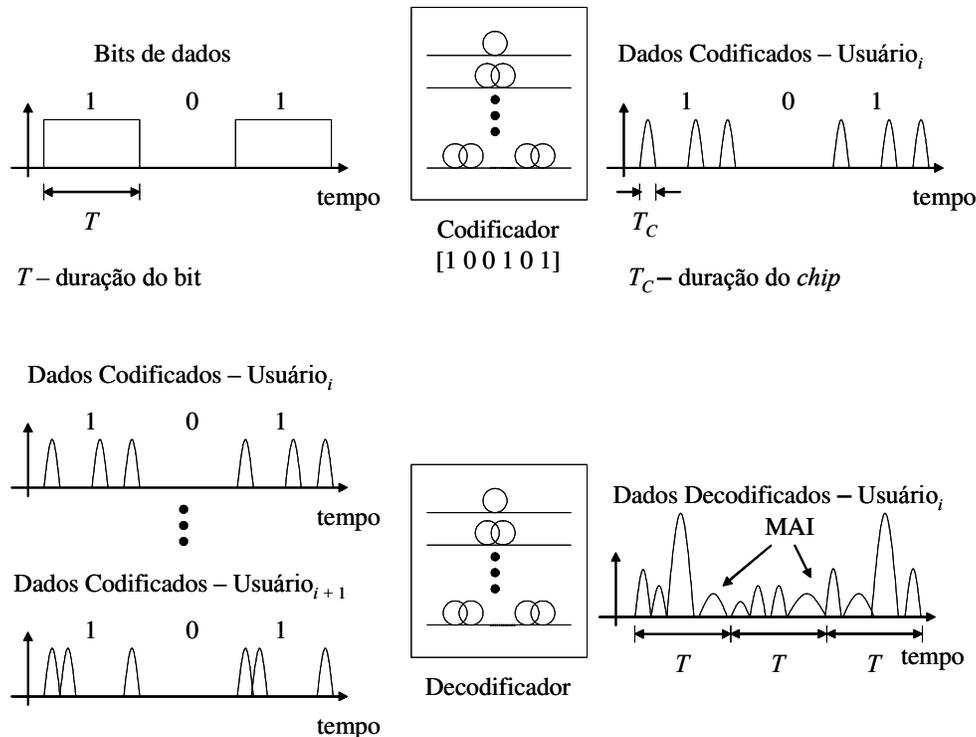


Fig. 2.3. Sistema ilustrativo de codificação e decodificação OCDMA.

Como foi destacada anteriormente, a principal fonte de ruído nos sistemas OCDMA é a MAI e uma das formas de minimizar este efeito é o dimensionamento de códigos ópticos que reduzam a contribuição da MAI no sinal recebido. Para isso, podem-se escolher códigos ópticos com boas propriedades de correlação para codificar a informação transmitida. Nos sistemas CDMA sem fio empregam-se códigos bipolares que consistem em seqüências de $\{-1,+1\}$. Os valores positivos e negativos são representados pela amplitude e fase do campo eletromagnético que pode ser detectado diretamente [2.35]. Porém, em sistemas de comunicação óptica emprega-se a detecção da potência óptica na forma de fotodetecção direta (detecção de fótons). Assim, os sistemas ópticos são de

detecção não-negativa [2.33] e os sistemas OCDMA devem ser desenvolvidos com códigos unipolares, ou não-coerentes, que consistem em seqüências de $\{1,0\}$. É importante ressaltar que foram desenvolvidas recentemente algumas tecnologias que possibilitam o emprego de códigos ópticos bipolares desenvolvidos para sistemas ópticos coerentes. Porém estas tecnologias ainda estão restritas a utilização em laboratório em função de sua elevada complexidade [2.41]. A principal diferença entre estes sistemas coerentes e não-coerentes é que nos sistemas não-coerentes empregam-se códigos ópticos unipolares que são obtidos por modulação em intensidade. Já nos sistemas coerentes empregam-se códigos ópticos bipolares que são obtidos por modulação por mudança de fase. A Fig. 2.4 (a) e (b) ilustra o processo de codificação e decodificação da informação transmitida empregando códigos unipolares e bipolares, respectivamente.

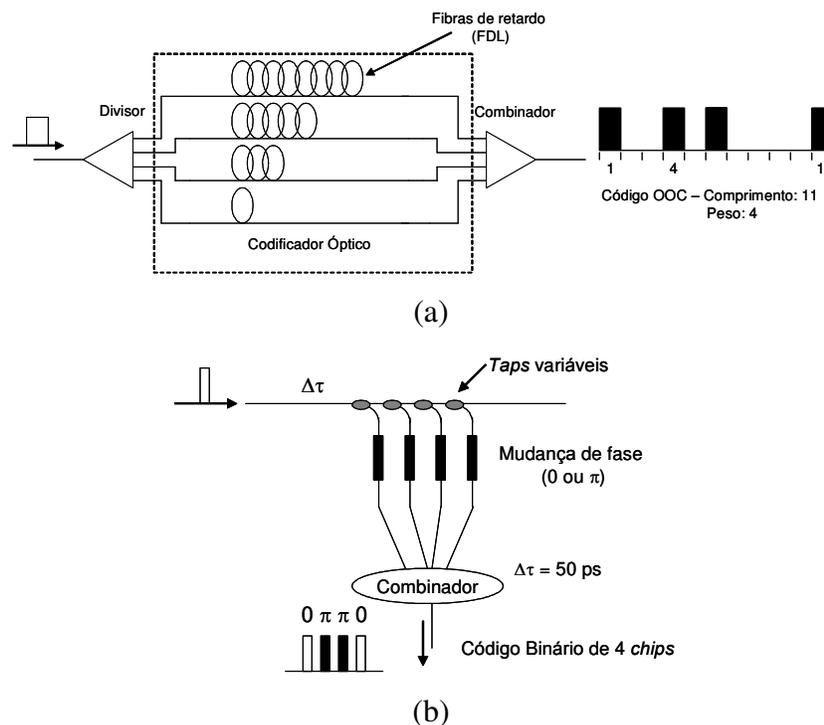


Fig. 2.4. Processo de codificação e decodificação empregando a tecnologia OCDM. (a) unipolar e (b) bipolar.

Os códigos unipolares apresentam uma pseudo-ortogonalidade e possuem uma relação sinal/ruído de interferência SIR (*Signal-to-Interference Noise Ratio*) menor que os códigos bipolares empregados em sistemas coerentes. Esta característica fornece um ganho muito alto de processamento aos sistemas coerentes, mas as dificuldades de implementação

ainda limitam a sua utilização [2.26][2.41]. A Tabela 2.1 ilustra uma comparação entre os códigos ópticos não-coerentes e coerentes.

Tabela 2.1. Comparação entre os códigos ópticos coerentes e não-coerentes.

	Não-coerente	Coerente
Tipo de Código	Unipolar	Bipolar
Modulação	Intensidade	Fase
Ortogonalidade	Pseudo-Ortogonal	Ortogonal
SIR	$\sim Chip$	$\sim Chip^2$

Em função de sua simplicidade de implementação, observa-se que diversas formas de códigos não-coerentes vêm sendo estudadas e empregadas, como códigos OOC, códigos primos, seqüência M, entre outros [2.36][2.43][2.41]. Os códigos OOC são largamente empregados em função de seus valores de correlação [2.40]. Além destas características, os códigos OOC apresentam características como a facilidade de construção e implementação. Por outro lado, constata-se o surgimento constante de propostas de construção que melhora o seu desempenho [2.34] [2.42]. Recentemente também foram propostos códigos OOC com peso variável [2.41][2.43], que permitem fornecer QoS e implementar classes de serviços diferenciados na camada óptica.

Na literatura verifica-se a existência de códigos que exploram mais de uma dimensão, como os códigos ópticos bidimensionais (2D) que consideram, por exemplo, tempo e comprimentos de onda [2.42] e tridimensionais (3D) que, além de tempo e comprimento de onda, incluem o estado da polarização [2.44]. Estes códigos apresentam um desempenho superior quando comparados com códigos unidimensionais OOC em função de possuírem maior grau de liberdade, porém verifica-se que a tecnologia das redes ópticas roteadas por comprimento de onda é incompatível com a utilização de códigos ópticos (2D) e (3D), pois, existiria uma desconexão entre as redes WDM e WDM/OCDM. A seguir apresenta-se um estudo dos códigos OOC.

2.3.2 Códigos Ópticos Ortogonais (OOC)

Um código OOC consiste de uma seqüência unipolar $\{1,0\}$ obtida por meio de codificadores compostos por fibras de retardo ou *lasers* que transmitem pulsos na ordem de fentossegundos [2.36]. Existem várias configurações de codificadores com fibras ópticas de retardo que podem gerar códigos OOC [2.32]. Uma das configurações largamente empregada está ilustrada na Fig. 2.4 (a), na qual o pulso óptico é dividido em vários pulsos por um divisor de potência e cada pulso passa por fibras de retardo com períodos de atraso distintos. O código OOC resulta da combinação de todos os pulsos provenientes da fibra de retardo. Por outro lado, podem-se obter codificadores sintonizáveis por meio de linhas de retardo sintonizáveis. Estas linhas consistem de m -estágios de chaves ópticas 2×2 , um acoplador óptico 2×2 e um conjunto de linhas de retardo baseadas em fibras ópticas.

Um sinal codificado por um código OOC pode ser analisado da seguinte forma. Considere uma informação produzida por um transmissor j num sistema OOK (*on-off keying*) e representada por uma seqüência binária $a_i^{(j)} \in \{1,0\}$ com duração de bit T . Empregando a modulação não retorna a zero (*Non-Return to Zero, NRZ*) o período T é dado por $T = 1/B$, onde B é taxa de bit transmitida. Este sinal é mapeado numa *codeword* $c_j = \{c_n^{(j)} \mid n = 0, 1, 2, \dots, L-1\}$, na qual $c_n^{(j)}$ é o $n^{\text{ésimo}}$ *chip* do $j^{\text{ésimo}}$ código, L é o comprimento do código que é representado pelo número total de *chips* e $c_n^{(j)} = c_{n+L}^{(j)}$. A informação codificada pode ser representada por [2.45]:

$$y^{(j)}(t) = \sum_l \sum_{n=0}^{L-1} a_l^{(j)} c_n^{(j)} r(t - nT_c - lT) \quad (2.1)$$

na qual $T_c \leq T/L$ é a duração de cada *chip* e $r(\cdot)$ é a unidade de amplitude do pulso retangular. Ignorando o ruído do receptor, o sinal correspondente decodificado no receptor é dado por:

$$d_k^{(j)} = \sum_l a_l^{(j)} \psi^{(j,k)}[t - (l+1)T], \quad \forall k \quad (2.2)$$

sendo

$$\psi^{(j,k)}(t) = \sum_{n=0}^{L_c-1} \sum_p c_p^{(j)} c_{p+n}^{(k)} r(t - nT_c) \quad (2.3)$$

Nos sistemas práticos

$$\psi_0^{(k,k)} = w$$

$$\psi_n^{(j,k)} > 0, \quad \forall n \text{ quando } j \neq k$$

$$\psi_n^{(k,k)} > 0, \quad n \neq 0$$

sendo $\psi^{(j,k)}(t) = \sum_{n=0}^{L_c-1} \sum_p c_p^{(j)} c_{p+n}^{(k)}$ e w é igual ao peso do código.

Os códigos OOCs podem ser definidos pelo seguinte conjunto de parâmetros (L , w , λ_a , λ_c), nos quais L ilustra o comprimento do código, ou seja, o número total de *chips*, w representa o peso do código que é dado pelo número de *chips* ativos, ou seja com valor “1” do código e λ_a , λ_c são respectivamente as restrições de auto-correlação e correlação-cruzada [2.40]. Estas restrições são definidas abaixo.

$$\sum_{l=0}^{L-1} x_l x_{l+\tau} = \begin{cases} w, & \text{para } \tau = 0 \\ \leq \lambda_a, & \text{para } 1 \leq \tau \leq L-1 \end{cases} \quad (2.4)$$

$$\sum_{l=0}^{L-1} x_l y_{l+\tau} \leq \lambda_c, \quad \text{para } 0 \leq \tau \leq L-1 \quad (2.5)$$

onde τ é o atraso entre as seqüências x_l e $y_l \in \{1,0\}$. Idealmente seria preferível empregar códigos ortogonais, ou seja, ($\lambda_a = \lambda_c = 0$). Entretanto, estas correlações não podem ser obtidas em sistemas ópticos por serem sistemas não-negativos. As propriedades de correlação descritas acima podem ser entendidas da seguinte forma [2.40][2.33] :

1. Para qualquer correlação não deslocada no tempo, a auto-correlação será igual ao peso do código e deve ser a maior possível para que o sinal recebido seja maior que o ruído do sistema.
2. Para qualquer correlação deslocada no tempo, a auto-correlação será menor que o peso do código. Este critério deve ser satisfeito para assegurar que o sinal na saída do correlacionador óptico seja menor quando não estiver sincronizado com o transmissor, isso permite que o OCDMA opere sem um sinal de *clock* global.
3. A correlação-cruzada entre qualquer par de *codewords* deve ter um pequeno valor. Esta propriedade assegura que cada *codeword* pode ser facilmente identificado mesmo na presença da MAI.

Sendo as condições acima satisfeitas o sistema operará de forma assíncrona e com baixa BER. Mesmo considerando que somente uma fração de usuários utiliza a rede óptica simultaneamente, é preciso prover um número de códigos ópticos para todos os usuários da rede. O número máximo de códigos ópticos disponíveis numa rede óptica é dado pela cardinalidade. A cardinalidade representa o número máximo de usuários suportado por um conjunto de códigos OOC com mesmo comprimento e peso que satisfazem as condições de correlação descritas anteriormente [2.40]. A cardinalidade destes códigos quando se considera a ortogonalidade óptica ($\lambda_a = \lambda_c = 1$) é dada por:

$$\phi(L, w, 1, 1) \leq \left\lfloor \frac{L-1}{w(w-1)} \right\rfloor \quad (2.6)$$

Sendo que $\lfloor x \rfloor$ representa a parte inteira de x .

O desempenho do sistema OCDMA, medido por meio da BER, considera o número simultâneo de usuários utilizando a rede. A probabilidade de erro depende do tipo de detecção utilizada. Assumindo, uma detecção convencional e uma igual probabilidade de transmissão dos bits “0” e “1”, a probabilidade de erro de bit, P_b , quando C códigos são empregados na rede é dada por $P_B = 0,5 (P_{B0} + P_{B1})$, na qual P_{B0} e P_{B1} , representam a probabilidade de erro de bit quando os bits “0” e “1” são transmitidos, respectivamente.

Considera-se que a maior fonte de erro ocorre quando o MAI gerado pela interferência excede o valor de limiar quando um bit “0” é transmitido [2.50], assim a P_B é dada por:

$$P_B = \frac{1}{2} \sum_{i=Th}^{C-1} \binom{C-1}{i} (q)^i (1-q)^{N-1-i} \quad (2.7)$$

na qual $q = \frac{w^2}{2L}$ é a probabilidade de sobreposição dos *chips* “1” (ativos). Uma alternativa utilizada nos sistemas de detecção é o emprego da detecção com limitação abrupta. A utilização desta técnica ou suas variações resulta numa elevada diminuição da probabilidade de erro de bit [2.46]. A técnica de limitação abrupta emprega o dispositivo óptico denominado *Hard-Limiter* antes do correlacionador óptico. Este dispositivo tem a função de limitar a energia que chega ao correlacionador óptico ao valor máximo correspondente à energia de um único pulso por *chip*. Assim, o *Hard-Limiter* diminui muito as chances de um bit “1” ser detectado quando um bit “0” for transmitido.

Os códigos não-coerentes OOC possuem o desempenho com relação ao número de usuários simultâneos inferior ao número de usuários simultâneos de sistemas que utilizam códigos coerentes bipolares [2.26]. Uma alternativa é utilização de códigos unipolares OOC com detecção de chaveamento de inversão de sequência (*Sequence Inversion Keying, SIK*) [2.47]. Neste tipo de codificação todos os bits “1” a serem transmitidos são codificados no formato da assinatura (OOC) e os bits “0” são codificados no formato do complemento da assinatura ($\overline{\text{OOC}}$). A vantagem de utilizar este esquema é que o desempenho é similar aos sistemas que utilizam códigos bipolares. A Fig. 2.5 ilustra o esquema de recepção utilizado no receptor.

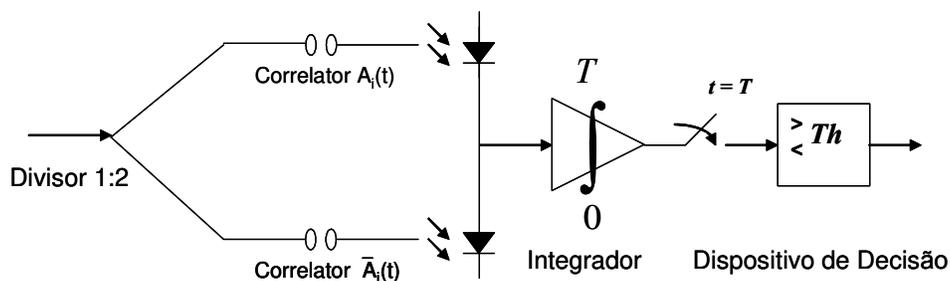


Fig. 2.5. Esquema SIK utilizado em conjunto com os códigos OOC.

O cálculo da BER no caso da configuração OOC-SIK pode ser obtido por meio de [2.47]:

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{SNR_{OOC-SIK}}{2}} \right) \quad (2.8)$$

sendo a relação sinal-ruído (SNR) dada por [2.47]:

$$SNR_{OOC-SIK} = \frac{(\mathfrak{R}P_R)^2}{\frac{2(C-1)}{3L}(\mathfrak{R}P_R)^2 + 16N_0} \quad (2.9)$$

sendo \mathfrak{R} a responsividade do fotodiodo PIN, P_R é a potência recebida no correlacionador óptico no destino final do caminho óptico e N_0 representa o ruído:

$$N_0 = B_e \left(\frac{e\mathfrak{R}CP_R}{4} + N_{th} \right) \quad (2.10)$$

sendo B_e a largura de banda, e é a carga do elétron e N_{th} densidade espectral de potência da corrente em função de efeitos térmicos.

Capítulo 3

Redes OBS com Reteamento por Códigos Ópticos e Comprimentos de Onda

Neste capítulo é realizada a proposta e a análise da utilização da tecnologia WDM/OCDM como camada de transporte para redes WR-OBS, com o objetivo de aumentar a eficiência de utilização e reduzir a latência das rajadas na rede. Em particular, rajadas com tempo de duração comparável ao tempo de comutação, o qual é determinado pelo tempo de ajuste dos OXCs e o tempo de reserva de comprimentos de onda. Assim, também é realizado um estudo comparativo das redes WR-OBS, tanto com camada de transporte WDM, como com camada de transporte WDM/OCDM.

3.1 Introdução

As redes ópticas WDM que empregam a comutação por circuitos com a confirmação da reserva de recursos e utilização dos circuitos por tempo de milissegundos pode ser classificada como rede WR-OBS ou rede OBS com confirmação (OBS-Aknowlogy, OBS/A) [3.1][3.2][3.3][3.4]. Este tipo de rede vem surgindo como uma alternativa para acomodar o constante crescimento de tráfego que se caracteriza pela diversidade de

serviços e variação dinâmica de seu padrão [3.2]. A reserva fim-a-fim é empregada para que as rajadas sejam transmitidas com garantia de recursos ao longo da rota e atraso máximo determinado de acordo com suas características de QoS [3.5]. Por outro lado, nas redes OBS com reserva em sentido único podem ocorrer perdas de rajadas na camada WDM em função do número limitado de comprimentos de onda disponíveis ao longo da rede e, ainda os requisitos de QoS podem não ser garantidos para aplicações de tempo real e de tráfego de alta prioridade [3.6]. Nas redes WR-OBS os pacotes são agregados eletronicamente nos roteadores de borda de acordo com seu destino e CoS (*Class of Service*), enquanto este processo está sendo realizado ocorre a reserva de recursos ao longo da rota determinada, assim numa determinada fase da agregação das rajadas é enviado um pacote de controle até o roteador de destino ou de controle [3.7]. O pacote de controle percorre a rota determinada realizando a reserva enlace por enlace, se os recursos da rota são inteiramente reservados, um pacote de confirmação é enviado para o roteador de borda de origem e a rajada é transmitida. Após a transmissão da rajada, o roteador de borda envia um pacote de controle para liberar os recursos reservados. Estas características garantem os requisitos de QoS em função do atraso máximo ser determinado pelo tempo empregado na agregação e reserva de recursos [3.8]. Este método possui vantagem sobre outras técnicas de QoS em redes OBS como a diferenciação de T_{Offset} em função das classes de serviço, em que se atribui alto valor de T_{Offset} ao tráfego de alta prioridade [3.9]. O principal efeito é a diminuição da probabilidade de perdas de rajadas para o tráfego de alta prioridade, porém aumenta a probabilidade de perdas de rajadas para o tráfego de baixa prioridade e também ocorre a redução da capacidade de transmissão da rede [3.10]. Outro efeito desta técnica é a possibilidade de prejudicar a conexão entre as camadas mais altas dos protocolos de rede, pois em cada pacote de baixa prioridade pode haver um grande número de protocolos de controle de transmissão (*Transfer Control Packet*, TCP) ou pacotes de confirmação. Todas estas características das redes WR-OBS, têm tornado este tipo de rede uma candidata natural para soluções futuras de redes ópticas. Porém, o tempo de estabelecimento das *lightpaths*, em função das tecnologias de dispositivos disponíveis, é apropriado para transmitir rajadas que devem suportar um certo atraso em função do armazenamento no roteador de borda [3.3]. Assim, se nenhum outro pacote chegar ao roteador de borda com mesmo destino ou CoS neste intervalo de tempo, a rajada é preenchida com pacotes sem

conteúdo [3.1]. Entretanto, o aumento do tráfego IP e Ethernet em redes locais, redes metropolitanas (*Metropolitan Area Network*, MAN) e redes de longo alcance (*Wide Area Network*, WAN) está diminuindo a eficiência de utilização destas redes, pois este tipo de tráfego é caracterizado por possuir pacotes com pequeno tamanho e de transporte instantâneo com baixa latência [3.2]. Neste contexto, a eficiência de utilização decai muito, principalmente se o comprimento da rajada é comparável ao tempo de comutação, que neste caso é determinado pelo ajuste dos OXCs e o tempo de reserva de comprimentos de onda [3.3].

Em função destas características de ineficiência de utilização da rede WR-OBS o objetivo deste capítulo é propor e analisar uma arquitetura de rede comutada por rajadas que utilize a tecnologia WDM/OCDM como camada de transporte, ou seja que empregue caminhos ópticos virtuais baseados em comprimentos de onda e códigos ópticos VOCP/VWP [3.11]. Com a utilização dos caminhos virtuais VOCP/VWP haverá a expansão de canais disponíveis e a redução da latência, principalmente para as rajadas que devem ser transportadas instantaneamente. A utilização de VOCP/VWPs possibilitará que caminhos ópticos virtuais que possuem a mesma rota ou apenas alguns enlaces em comum possam empregar o mesmo comprimento de onda, porém com códigos ópticos distintos. Desta forma, o tempo de uma requisição de um VOCP/VWP já estabelecido será menor que o tempo de solicitação de um VOCP/VWP onde não haja nenhum enlace estabelecido. Assim existe uma economia de tempo e um aumento de utilização dos recursos da rede.

O restante deste capítulo está organizado da seguinte forma. Na Seção 3.2 ilustra-se a arquitetura da rede proposta e analisada. Na Seção 3.3 é apresentada a metodologia de análise de desempenho. Na Seção 3.4 apresentam-se os principais resultados e finalmente, na Seção 3.5 discutem-se as principais conclusões obtidas neste trabalho.

3.2 Arquitetura da Rede

Na aplicação da camada de transporte WDM/OCDM proposta neste trabalho as rajadas obtidas pela agregação de pacotes nos roteadores de borda são transmitidas por meio de sua codificação por códigos OOC através de comprimentos de onda. Assim, o

roteamento ao longo da rede é realizado utilizando caminhos virtuais baseados em comprimentos de onda e códigos ópticos VOCP/VWP. Esta arquitetura utiliza a concentração do armazenamento dos pacotes nos roteadores de borda possibilitando a utilização de OXCs de núcleo sem armazenamento óptico das rajadas. Assim, o projeto dos OXCs é simplificado e o custo diminui. Os OXCs empregados no núcleo da rede são os mesmos descritos no Capítulo 4. No dimensionamento destas redes considera-se o controle centralizado como pior caso, porém pode-se empregar o controle distribuído ao longo da rede, desde que seja assumida a rápida distribuição das informações sobre o estado da rede [3.3].

Os pacotes são agregados eletronicamente de acordo com seu destino e CoS em filas separadas. Após a indicação que os pacotes devem ser transmitidos em função de seus requerimentos de QoS, um pacote de controle é enviado ao nó central e quando a confirmação é recebida o conteúdo armazenado é transmitido numa VOCP/VWP. O roteador de borda possui N entradas independentes de tráfego, M filas de classe de serviços e D é o número de destinos possíveis, assim este roteador tem dimensão dada por $N \times M \cdot D$. A Fig. 3.1 ilustra a arquitetura simplificada do roteador de borda.

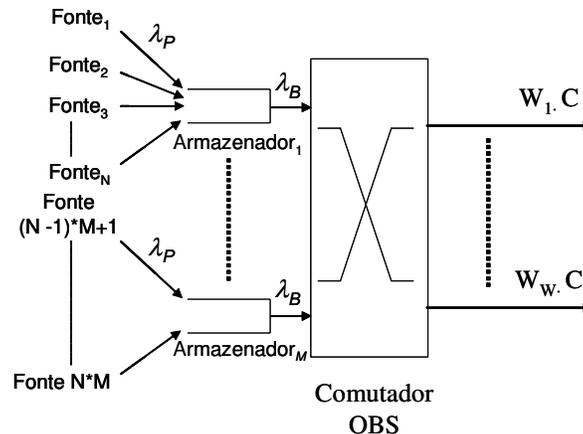


Fig. 3.1. Arquitetura simplificada do roteador de borda.

A taxa $b_{\text{eletrônica}}$ representa a taxa agregada de pacotes de todas N fontes com mesmo destino e mesmos requisitos de QoS. As rajadas são transmitidas numa taxa $b_{\text{óptica}}$, onde $b_{\text{óptica}} > b_{\text{eletrônica}}$. O processo de agregação dos pacotes pode ser visualizado na Fig. 3.2 e é descrito da seguinte forma.

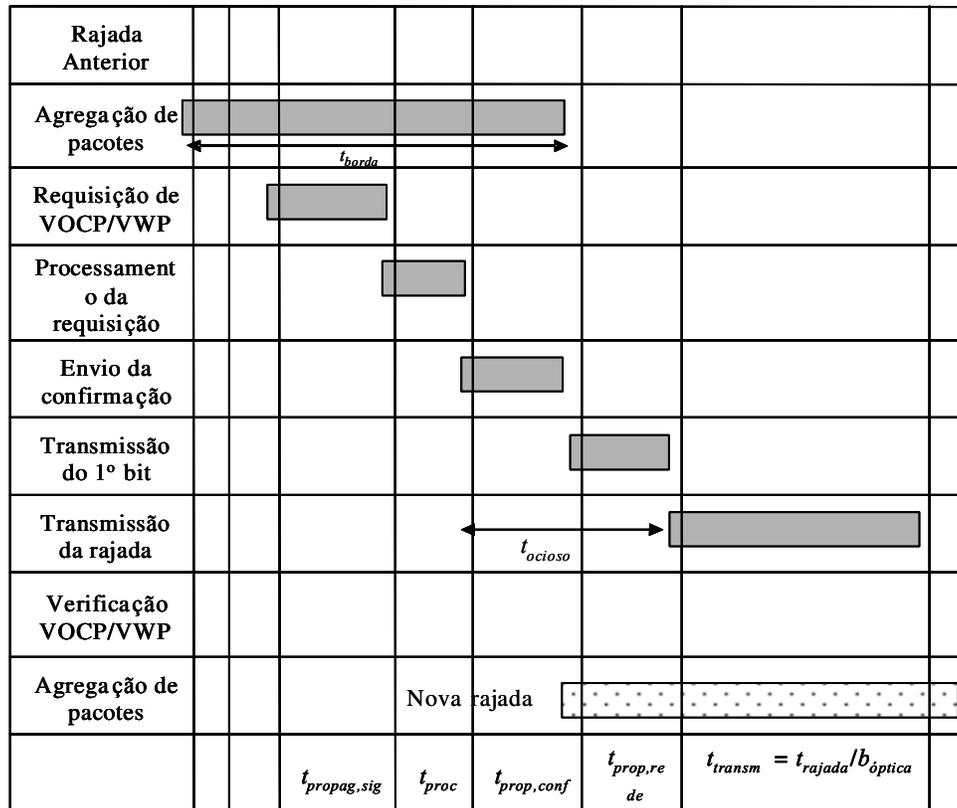


Fig. 3.2. Processo de agregação das rajadas e reserva de recursos.

O atraso no roteador de borda é denominado t_{borda} e é definido como o tempo entre a chegada do primeiro bit do primeiro pacote na fila de armazenamento até a rajada inteira ser transmitida, assim o atraso médio para todos os pacotes agregados é dado por $t_{borda}/2$ se for considerado um processo de chegada de Poisson [3.8]. Os pacotes são armazenados eletronicamente até o limite suportado pelos armazenadores ou o tempo limite, para o caso de requisitos de QoS, em um determinado instante durante o armazenamento é enviada uma requisição, por meio de um pacote de controle, de caminho óptico VOCP/VWP, para o nó central. O tempo de propagação deste pacote de controle é denominado $t_{propag,sig}$. O pacote de controle contém informações sobre o roteador de borda de ingresso e de egresso, CoS, comprimento da rajada que será transmitida e tempo estimado de utilização do caminho virtual t_{util} . O t_{util} é definido como o tempo necessário para esvaziar o armazenador eletrônico e transmitir a rajada entre os dois roteadores de borda. O tempo de processamento da requisição do VOCP/VWP é definido por t_{proc} . Após a definição de qual VOCP/VWP atenderá a requisição é enviado o pacote de controle de confirmação com

atraso definido por $t_{prop,conf}$. Neste intervalo de tempo ocorre a reserva do caminho virtual VOCP/VWP que atenderá a requisição e se inicia a contagem do t_{util} . Em paralelo ao processo descrito, a agregação dos pacotes continua ocorrendo até o recebimento da confirmação de reserva do VOCP/VWP. O VOCP/VWP não poderá ser utilizado durante o tempo de recebimento da confirmação e a propagação da informação na rede, assim o t_{util} é definido pelo tempo de transmissão da rajada (t_{transm}) adicionado ao tempo que o caminho virtual ficou ocioso (t_{ocioso}) aguardando a confirmação e o início da chegada dos dados no roteador de borda de egresso dado por $t_{prop,rede}$, assim $t_{ocioso} = t_{prop,conf} + t_{prop,rede}$ ou seja, $t_{util} = t_{ocioso} + t_{transm}$, o tempo de transmissão é definido por $t_{transm} = t_{rajada}/b_{\text{óptica}}$, sendo t_{rajada} a duração da rajada e $b_{\text{óptica}}$ a taxa de transmissão nos enlaces da rede óptica. A latência máxima que os pacotes experimentam ao serem transmitidos e saírem no roteador de borda de egresso é dada por [3.5]:

$$Atraso_{Max} = t_{borda} + t_{prop,rede} + \frac{t_{rajada}}{b_{\text{óptica}}} \quad (3.1)$$

3.3 Metodologia de Análise

Para realizar a análise de desempenho da rede comutada por rajadas e roteada por códigos ópticos/comprimentos de onda serão analisados dois itens distintos:

1. Probabilidade de perdas de rajadas considerando a disponibilidade de caminhos virtuais VOCP/VWP no roteador de borda em virtude da limitação imposta pela MAI.
2. Desempenho do núcleo da rede quando se emprega VOCP/VWP considerando os tempos envolvidos no processo de agregação e sinalização.

Para analisar o impacto do emprego de caminhos ópticos virtuais VOCP/VWP nas redes WR-OBS será empregada a métrica da probabilidade de perdas de rajadas em um roteador de borda. Esta análise é de extrema importância e fornece um panorama do desempenho da rede, pois as perdas de rajadas nestas redes ocorrem principalmente nos roteadores de borda, em virtude deste tipo de rede concentrar nos roteadores de borda a

maioria das funções como agregação, armazenamento e sinalização. Para calcular a probabilidade de perdas de rajadas será utilizado o modelo proposto em [3.14]. Este modelo é utilizado para calcular a probabilidade de perdas de rajadas em um enlace da rede OBS sem a consideração de utilização de algoritmos específicos de agregação ou roteamento, assim é apropriado para mostrar a variação do desempenho da rede em função do aumento do número de canais disponíveis como no emprego dos caminhos ópticos virtuais VOCP/VWP. Neste modelo se considera que cada enlace WDM/OCDM possui W comprimentos de onda e C códigos OOC por comprimento de onda, assim existem $K_c = W \cdot C$ canais VOCP/VWP por enlace. Considerando ser M o número de armazenadores eletrônicos disponíveis para agregação de pacotes de acordo com destino e CoS, e $N \cdot M$ o número de fontes de pacotes que chegam num mesmo armazenador. A taxa de chegada dos pacotes é distribuída de acordo com um processo de Poisson com média λ_p e taxa de serviço μ_p , formando uma rajada que é transmitida num dos K_c canais disponíveis. Cada canal K_c representa uma fonte de transmissão na rede sendo os períodos em que as rajadas são transmitidas considerados períodos *On* e o período de tempo entre as rajadas é considerado períodos de *Off* como ilustra a Fig. 3.3.

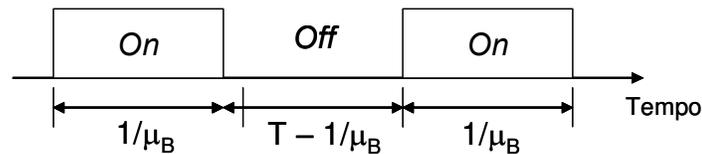


Fig. 3.3. Modelo *On-Off* de tráfego de rajadas.

Em cada intervalo de tempo de T (segundos) os pacotes armazenados num armazenador eletrônico são agregados numa rajada e disponibilizados para a transmissão numa taxa média de chegada λ_B que é dado por $\lambda_B = 1/T$. Por outro lado, a taxa de serviço ou comprimento das rajadas depende da estatística do tráfego de entrada é dado por $\mu_B = \mu_p / NT\lambda_p$. Assim a carga de entrada das rajadas é dada por $\rho_B = \lambda_B / \mu_B = N\lambda_p / \mu_p = N\rho_p$, sendo ρ_p a carga de entrada dos pacotes. Outra forma de representação dos parâmetros de tráfego deste modelo é em função da distribuição dos

períodos de *On* e *Off*, ou seja, o inverso da média do período de *On*, $\hat{\mu}_B$ é igual a μ_B enquanto o inverso da média do período de *Off*, $\hat{\lambda}_B$, é igual a $1/(T - 1/\mu_B)$.

Nesta análise não se consideram os tempos utilizados no processo de agregação das rajadas e as técnicas específicas empregadas neste processo, assim a probabilidade de perdas de rajadas obtida representa um caso estacionário. A probabilidade de perdas de rajadas (*Burst Blocking Probability, BBP*) do roteador de borda OBS é dada por:

$$BBP = \frac{T_o - T_c}{T_o} \quad (3.2)$$

Sendo T_o e T_c o tráfego oferecido e o tráfego transportado, respectivamente. T_o é obtido por meio da taxa média de chegada e sua respectiva probabilidade:

$$T_o = \sum_{i=0}^k \hat{\rho}(M-i)\pi_i \quad (3.3)$$

T_c é dado pelo número médio de circuitos ativos:

$$T_c = \sum_{i=0}^k i\pi_i \quad (3.4)$$

π_i é dado por [3.46]:

$$\pi_i = \frac{\binom{M-1}{k} \hat{\rho}^k}{\sum_{i=0}^k \binom{M-1}{i} \hat{\rho}^i} \quad (3.5)$$

A relação entre a probabilidade de perdas de rajadas e os parâmetros do comutador de borda OBS é obtida por meio de [3.14]:

$$\rho = \frac{t_{propag} + B_B}{1/\lambda_B + t_{borda}} \quad (3.6)$$

sendo ρ a intensidade de carga e B_B o comprimento da rajada, ou seja, os períodos On na saída de cada armazenador eletrônico:

$$B_B = \frac{1}{\mu_B} + \left(\frac{\lambda_B}{\mu_B} \right) (t_{propag} + t_{borda}) \quad (3.7)$$

Ainda pode ser estabelecida a intensidade de tráfego normalizada, $\hat{\rho}$, definida como:

$$\hat{\rho} = \frac{\rho}{1 + \rho} = \frac{\lambda_B}{\lambda_B + \mu_B} \quad (3.8)$$

A intensidade de tráfego normalizada pode ser considerada equivalente a utilização do enlace em que as rajadas são transmitidas. Desta forma, neste trabalho estes dois parâmetros serão considerados equivalentes.

No restante deste estudo será considerado um comprimento de onda disponível nos enlaces WDM e um comprimento de onda $\times C$ OOCs canais disponíveis nos enlaces WDM/OCDM. A taxa média de erro de bit (\overline{BER}) nos enlaces WDM/OCDM é calculada por meio de:

$$\overline{BER} = \sum_{i=1}^C p(i) BER(i) \quad (3.9)$$

sendo $BER(i)$ a taxa de erro de bit em cada código OOC e $p(i)$ representa a probabilidade de i bits transportados por C códigos OOC distintos estarem sobrepostos. Considerando que a intensidade de tráfego de todos os enlaces é igual, esta probabilidade pode ser descrita por meio de uma distribuição de probabilidade Binomial [3.46]:

$$p(i) = \binom{C}{i} \hat{\rho}^i (1 - \hat{\rho})^{C-i} \quad (3.10)$$

No intuito de considerar o pior caso, adota-se o critério que os bits transportados em

cada OOC estão sincronizados, assim haverá a sobreposição integral do período dos bits interferentes. Portanto, a \overline{BER} pode ser escrita como:

$$\overline{BER} = \sum_{i=1}^C \binom{C}{i} \hat{\rho}^i (1 - \hat{\rho})^{C-i} \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{SNR_{OOC-SIK}}{2}} \right) \quad (3.11)$$

$$SNR_{OOC-SIK} = \frac{(\Re P_R)^2}{\frac{2(C-1)}{3L} (\Re P_R)^2 + 16B_e \left(\frac{e\Re CP_R}{4} + N_{th} \right)} \quad (3.12)$$

Desta forma, a *BBP* considerando os efeitos da MAI é descrita como uma probabilidade condicional das perdas de rajadas dada uma BER no caminho óptico virtual. Portanto, se a \overline{BER} for maior que o nível estabelecido a transmissão da rajada será bloqueada:

$$BBP = \begin{cases} BBP & \text{se } \overline{BER} < 10^{-9} \\ 1 & \text{se } \overline{BER} \geq 10^{-9} \end{cases} \quad (3.13)$$

Até este ponto considerou-se a probabilidade de perdas de rajadas em função dos recursos disponíveis na rede, porém em função do impacto da utilização de caminhos virtuais VOCP/VWP será investigada a relação entre o desempenho da rede e os tempos envolvidos nos processos de agregação e sinalização. Nas análises realizadas a seguir considera-se que existam VOCP/VWP disponíveis, ou seja, as condições estudadas consideram um algoritmo RCA ideal. Os resultados obtidos podem ser empregados no dimensionamento de redes WR-OBS com camada de transporte WDM e WDM/OCDM, bem como utilizados como métricas para controle da rede por meio de algoritmos de RCA.

Após o processo de agregação dos pacotes a rajada é atribuída a um canal disponível. Este canal será utilizado até a rajada armazenada no roteador de borda de ingresso ser totalmente transmitida ao nó de borda de egresso. A análise a seguir é baseada em valores médios dos parâmetros descritos. O tempo estimado de utilização do caminho virtual t_{util}

pode ser obtido pela equivalência com o tempo de permanência de chamadas em redes comutadas por circuitos, dado por [3.5]:

$$t_{util} = t_{ocioso} + \frac{t_{rajada}}{b_{\acute{o}ptico}} = t_{ocioso} + \frac{1}{A} \cdot t_{borda} \quad (3.14)$$

sendo $A = b_{\acute{o}ptico}/b_{eletr\acute{o}nico}$. Para redes WDM/OCDM, $b_{\acute{o}ptico}$ é dado por BL , sendo L o comprimento do código OOC. Para redes WDM, $b_{\acute{o}ptico}$ é dado por B .

A seguir define-se o B_{Canal} que indica a largura de banda efetivamente utilizada por caminho óptico virtual para transmissão de dados entre os roteadores de borda da rede. O B_{Canal} é definido como a duração da rajada sobre o tempo de utilização do canal:

$$B_{Canal} = \frac{b_{eletr\acute{o}nico} \cdot t_{borda}}{t_{ocioso} + t_{borda} / A} \quad (3.15)$$

A relação entre a largura de banda por canal virtual e a taxa de transmissão dos enlaces da rede definem o parâmetro conhecido como utilização da rede (U_B), este parâmetro descreve a eficiência de utilização da largura de banda dos canais ópticos.

$$U_B = \frac{B_{Canal}}{b_{\acute{o}ptico}} = \frac{t_{borda}}{A \cdot t_{ocioso} + t_{borda}} \quad (3.16)$$

A otimização do parâmetro U_B representa o aumento de utilização dos recursos disponíveis na rede. Em redes ópticas de alta velocidade o tempo de agregação de uma rajada é significativamente maior que o tempo de sua transmissão [3.8]. Assim, no caso de alocação dinâmica de canais virtuais, um canal não utilizado pode ser atribuído a outro roteador de borda e resultar numa maior re-utilização de recursos, a re-utilização de recursos pode ser definida como Fator de Re-utilização de Canais (FRC):

$$FRC = \frac{A \cdot t_{borda}}{A \cdot t_{ocioso} + t_{borda}} \quad (3.17)$$

3.4 Resultados

Nesta seção serão apresentados alguns resultados numéricos para ilustrar o desempenho da utilização da rede de transporte WDM/OCDM e também será realizada a comparação entre o desempenho de redes WDM/OCDM e WDM. Inicialmente será analisado o desempenho de um roteador de borda WR-OBS considerando a utilização de enlaces WDM/OCDM e WDM. No caso de enlaces WDM/OCDM será ilustrada na Fig. 3.4 a taxa de erro de bit média (\overline{BER}) em função do número de códigos ópticos por comprimento de onda para códigos OOC na configuração SIK com peso distinto e $\rho = 0,5$. Na obtenção dos resultados desta seção foram considerados os seguintes parâmetros típicos $\mathfrak{R} = 0,85$, $P_R = -10$ dBm, $B_e = B/2$, $N_{th} = 1\text{pA}^2\text{Hz}^{-1}$ e a BER para cada código foi calculada empregando (2.8). A \overline{BER} em função do número de códigos por enlace ilustrada na Fig. 3.4 é obtida por meio de (3.11) e (3.12).

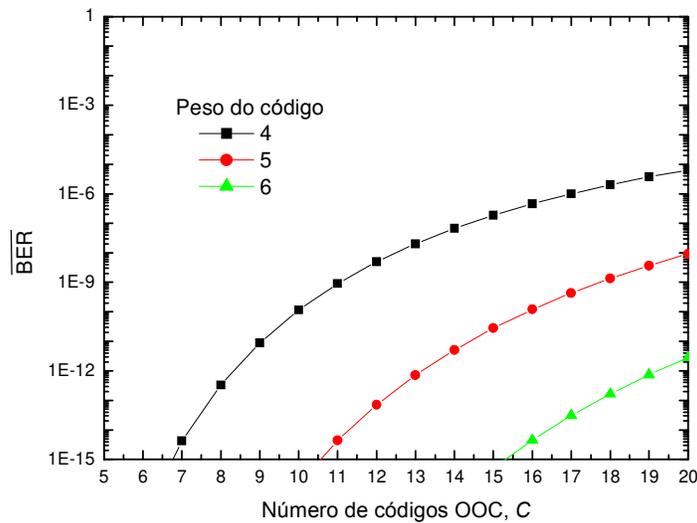


Fig. 3.4. Taxa média de erro de bits em função do número de códigos ópticos por comprimento de onda para códigos OOC com peso 4, 5 e 6 e $\hat{\rho} = 0,5$ para cada enlace WDM/OCDM.

A Fig. 3.4 ilustra o aumento da BER média em função do número de códigos ópticos para pesos distintos. O aumento da BER ocorre em função dos efeitos da MAI, porém

estes efeitos são menos degradantes para códigos com maior peso. A MAI resulta da diferença de valores entre a auto-correlação e a correlação cruzada, entretanto o valor máximo de auto-correlação é o peso do código. Desta forma, considerando os efeitos da MAI os códigos com maior peso serão empregados para garantir a menor BER.

A Fig. 3.5 ilustra a BBP em função da utilização do enlace, $\hat{\rho}$, para 10, 20 e 30 códigos com peso igual a 5 por comprimento de onda. Para a configuração WDM/OCDM foi considerado um número de buffers $M = 2C$ e, para a configuração WDM foi considerado um número de buffers $M = 2$. Esta consideração é empregada na obtenção do restante dos resultados. A BBP em função da utilização do enlace considerando os efeitos da MAI ilustrada na Fig. 3.5 é obtida por meio de (3.13) e a \overline{BER} é calculada por meio de (3.11) e (3.12).

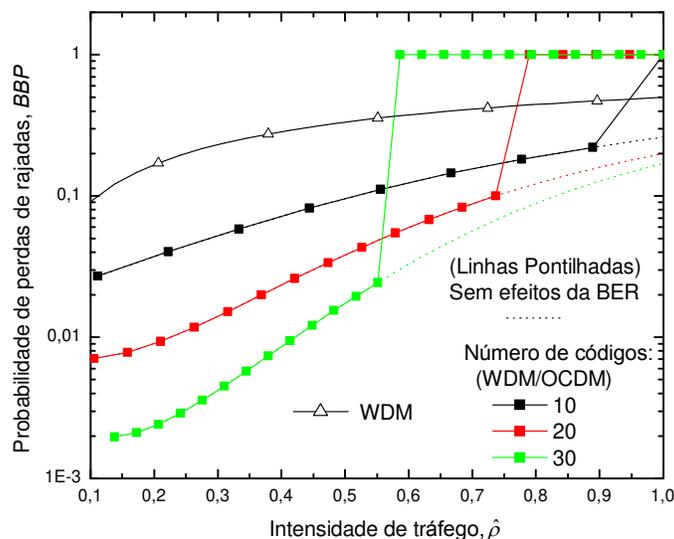


Fig. 3.5. Probabilidade de perdas de rajadas em função da utilização do enlace, $\hat{\rho}$, para 10, 20 e 30 códigos por comprimento de onda com peso igual a 5.

Por meio da Fig. 3.5 verifica-se que a probabilidade de perdas de rajadas é menor para enlaces WDM/OCDM quando comparado com enlaces WDM. Por outro lado, no esquema WDM/OCDM o aumento do número de códigos ópticos implica na diminuição da probabilidade de perdas de rajadas. Estes efeitos são explicados pelo maior número de canais disponíveis para escoar o tráfego. Porém, o aumento do número de códigos ópticos acarretará o aumento da MAI que resulta no aumento da BER. Desta forma se a BER for

maior que a BER de limiar (10^{-9}) haverá perdas de rajadas. O aumento da utilização do enlace implicará no aumento da probabilidade de sobreposição de erros de bits, assim o aumento da utilização do enlace influenciará na probabilidade de perdas de rajadas. Por exemplo, a menor probabilidade de perdas de rajadas é obtida empregando 30 códigos ópticos por comprimento de onda. Porém esta configuração só pode ser empregada para uma utilização de enlace máxima de 0,55, pois para valores maiores a BER será maior que o valor de limiar e as rajadas serão perdidas. Com intuito de observar a influência do peso do código na probabilidade de perdas de rajadas é ilustrada na Fig. 3.6 a probabilidade de perdas de rajadas em função da utilização de enlace para 10 e 20 códigos por comprimento de onda com peso igual a 4, 5 e 6. A *BBP* em função da utilização do enlace considerando os efeitos da MAI ilustrada na Fig. 3.6 é obtida por meio de (3.13) e a \overline{BER} é calculada por meio de (3.11) e (3.12).

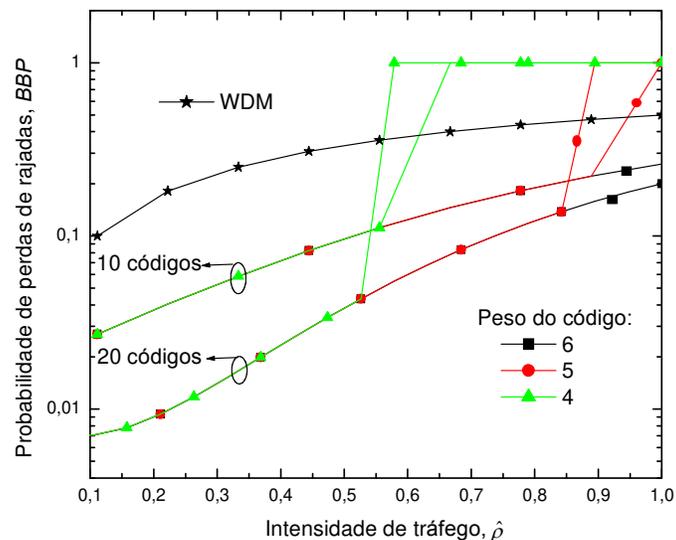


Fig. 3.6. Probabilidade de perdas de rajadas em função da utilização de enlace, $\hat{\rho}$, para 10 e 20 códigos por comprimento de onda com peso igual a 4, 5 e 6.

Por meio da Fig. 3.6 verifica-se que o aumento do peso do código resultará na diminuição da probabilidade de perdas de rajadas. Na configuração analisada observa-se que para códigos com peso 6 os efeitos da MAI não influenciarão a probabilidade de perdas de rajadas. Por outro lado, observa-se que para outros pesos haverá a limitação de utilização do enlace. Por exemplo, para códigos com peso 4 e 5 a utilização máxima de enlace será

0,85, 0,53, respectivamente, no caso de 10 códigos por comprimento de onda. Para valores maiores de utilização de enlace ocorrerá um aumento na probabilidade de sobreposição de erros de bits e a BER será maior que o valor de limiar.

Como foi ilustrado anteriormente, as redes WR-OBS concentram a maior parte de suas funcionalidades nos roteadores de borda, desta forma é importante analisar o atraso médio dos dados neste roteador. Assim na Fig. 3.7 ilustra-se a probabilidade de perdas de rajadas em função do número de códigos OOC considerando o atraso de agregação ou atraso de borda de 10, 20 e 50 ms, este é um importante parâmetro em função do impacto que terá nas técnicas de agregação de rajadas e nos requisitos de QoS dos pacotes. Neste estudo foi considerada uma taxa média de chegada de pacotes ($1/\lambda_p$) de $4\mu\text{s}$, um atraso de propagação de 10 ms que é equivalente a uma rede com diâmetro de 1000 km [3.14] e códigos com peso igual 5. A BBP em função da utilização do enlace considerando os efeitos da MAI ilustrada na Fig. 3.7 é obtida por meio de (3.13) e a \overline{BER} é calculada por meio de (3.11) e (3.12).

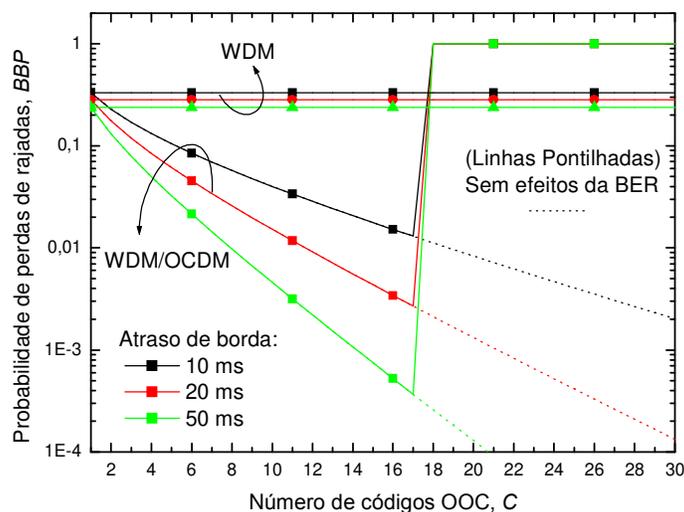


Fig. 3.7. Probabilidade de perdas de rajadas em função do número de códigos por comprimento de onda para um atraso de borda de 10, 20 e 50 ms, $1/\lambda = 4\mu\text{s}$, $t_{RTP} = 10$ ms (1000 km) e códigos com peso igual 5.

Por meio da Fig. 3.7 verifica-se que a probabilidade de perdas de rajadas decai em função do aumento do número de códigos OOC. Entretanto, o aumento do número de

códigos resulta no aumento da MAI que neste caso limita o número máximo de códigos por comprimento de onda em aproximadamente 17. Outro resultado ilustrado é a menor probabilidade de perdas de rajadas quando ocorre um maior tempo de agregação de pacotes. Este efeito é explicado pela economia de recursos da rede durante o processo de agregação, pois o tempo de transmissão na rede é muito menor que o tempo de agregação. Desta forma, quanto maior o tempo em que estiver ocorrendo o processo de agregação, maior será a disponibilidade dos recursos da rede para atenderem outras solicitações de transmissão. Com o intuito de ilustrar os efeitos dos parâmetros dos códigos OOC é ilustrada na Fig. 3.8 a probabilidade de perdas de rajadas em função do número de códigos ópticos para um atraso de agregação de 20 ms e peso de código igual a 4, 5 e 6. O restante dos parâmetros são os mesmos empregados na obtenção dos resultados ilustrados na Fig.3.7. A BBP em função da utilização do enlace considerando os efeitos da MAI ilustrada na Fig. 3.8 é obtida por meio de (3.13) e a \overline{BER} é calculada por meio de (3.11) e (3.12).

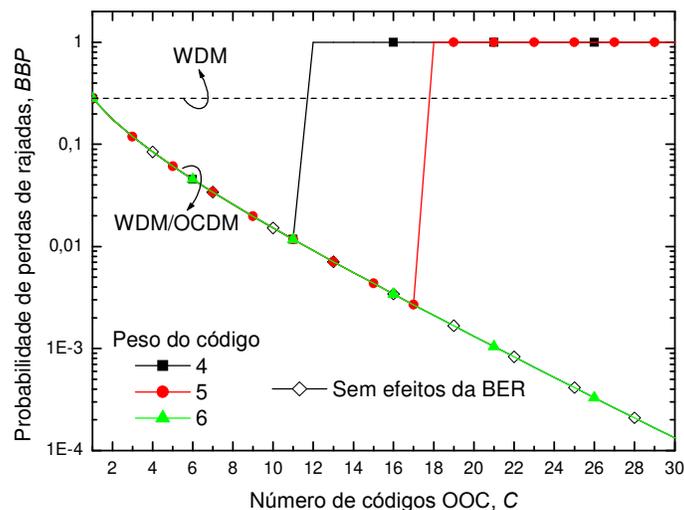


Fig. 3.8. Probabilidade de perdas de rajadas em função do número de códigos por comprimento de onda para um atraso de borda de 20 ms, $1/\lambda = 4\mu\text{s}$, $t_{RTP} = 10$ ms (1000 km) e códigos com peso igual 4, 5 e 6.

Por meio da Fig. 3.8 observa-se que o aumento do número de códigos ópticos resulta na diminuição da probabilidade de perdas de rajadas, porém o número máximo de códigos ópticos permitido depende do peso do código empregado. Este efeito ocorre em função da

MAI, pois a auto-correlação é proporcional ao peso do código. Assim, se observa um número máximo de códigos utilizados igual a 10 e 17 para pesos 4 e 5, respectivamente. Por outro lado, observa-se que códigos com peso igual a 6 não sofrem os efeitos da MAI até um número de aproximadamente 30 códigos por comprimento de onda.

Com os resultados obtidos até este ponto, verificou-se que a utilização da tecnologia WDM/OCDM como camada de transporte em redes WR-OBS resulta numa diminuição da probabilidade de perdas de rajadas. A utilização de tecnologia WDM/OCDM resulta em uma menor probabilidade de perdas de rajadas quando comparada com a utilização da tecnologia WDM. Também observou-se que ocorre a diminuição da latência nos roteadores de borda, satisfazendo os requisitos de QoS de aplicações sensíveis como pacotes IP e Ethernet.

Agora será analisado o desempenho da rede WR-OBS considerando a relação entre os tempos envolvidos nos processos de agregação e sinalização tanto para redes que utilizam camada de transporte WDM como WDM/OCDM. Inicialmente será estudado o t_{util} que representa o tempo estimado de utilização do caminho virtual. Este estudo é mostrado na Fig. 3.9 onde se ilustra t_{util} em função do t_{borda} para t_{ocioso} de 2, 5 e 10 ms. Para as redes WDM/OCDM foram considerados 5 códigos OOC com peso igual a 5. As taxas de transmissão consideradas no restante deste trabalho são $b_{eletrônico}$ igual a 1 Gbps e $b_{óptico}$ igual a 10 Gbps. O t_{util} em função do t_{borda} ilustrado na Fig. 3.9 é obtido por meio de (3.14).

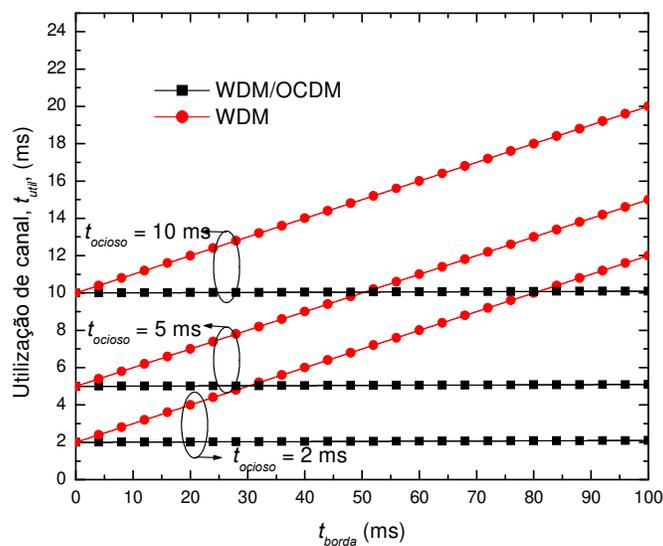


Fig. 3.9. Tempo de utilização, t_{util} em função do atraso dos pacotes no roteador, t_{borda} .

Por meio da Fig. 3.9 verifica-se que o t_{ocioso} influencia no t_{util} e, por consequência influencia também no QoS. Por outro lado, verifica-se que o t_{util} aumenta em função do t_{borda} para redes WDM, já para redes WDM/OCDM esta variação é mínima e pode ser considerada constante. Nas redes WDM/OCDM, mesmo havendo a variação do t_{borda} , o aumento do $b_{óptico}$ diminui o impacto do aumento do t_{borda} , assim a qualidade de serviço será pouco afetada em função do tempo de espera no roteador de borda, desde que os valores de t_{ocioso} sejam baixos.

Como foi ilustrado anteriormente, em redes ópticas de alta capacidade, o tempo necessário para agregar as rajadas é maior que o tempo para transmiti-las. Desta forma o reuso dos recursos disponíveis é crucial para aumentar o desempenho da rede. O parâmetro que será empregado para quantificar a capacidade de re-utilizar os canais disponíveis da rede é o Fator de Re-Utilização de Canais (FRC). Este parâmetro representa a capacidade de re-utilização dos canais que são comprimentos de onda e comprimentos de onda/códigos OOC para redes WDM e WDM/OCDM, respectivamente. Este estudo está ilustrado na Fig. 3.10, onde mostra-se o FRC em função do t_{borda} para redes WDM e WDM/OCDM considerando o t_{ocioso} de 2, 5 e 10 ms. Para rede WDM/OCDM foram considerados 5 códigos OOC com peso 5. O FRC em função do t_{borda} ilustrado na Fig. 3.10 é obtido por meio de (3.17).

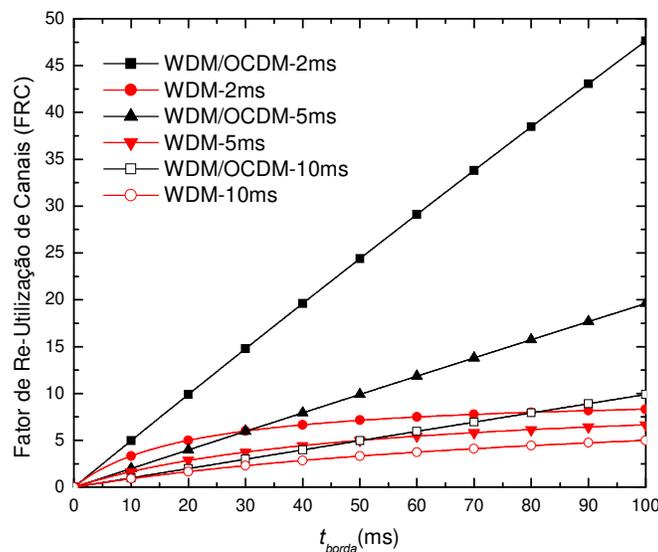


Fig. 3.10. Fator de Re-Utilização de Canais (FRC) em função do atraso dos pacotes no roteador, t_{borda} .

Por meio da Fig. 3.10, verifica-se que o FRC aumenta em função do aumento do t_{borda} e é influenciado pelo t_{ocioso} . Outro resultado importante é que o FRC é maior para redes WDM/OCDM que para redes WDM, este comportamento ocorre em função do maior número de canais disponíveis para o caso de redes WDM/OCDM.

Com os resultados obtidos se verificou que as redes WR-OBS que empregam a tecnologia WDM/OCDM como camada de transporte apresentam menor latência, maior granularidade e maior fator de re-utilização de canais que as redes WDM. Assim, o seu estudo deve ser aprofundado em função das vantagens apresentadas.

3.5 Sumário

Neste capítulo foi proposta e analisada a utilização da tecnologia WDM/OCDM como camada de transporte para redes WR-OBS. Estas redes se caracterizam por utilizarem protocolo de reserva fim-a-fim de recursos e apresentar atraso determinístico com garantia de QoS. Porém, o aumento do tráfego de pacotes com pequeno tamanho e de transporte instantâneo com baixa latência está diminuindo a eficiência de utilização destas redes. Neste contexto, a eficiência de utilização decai, principalmente se o comprimento da rajada é comparável ao tempo de comutação dos OXCs. Em função destas características de ineficiência de utilização da rede WR-OBS, o objetivo do emprego de caminhos ópticos virtuais baseados em comprimentos de onda e códigos ópticos VOCP/VWP é a expansão de canais disponíveis e redução da latência das rajadas na rede, pois observa-se que as rajadas podem ser transmitidas por caminhos virtuais parcialmente estabelecidos, e desta forma aumentar a utilização da rede. Para análise da rede WR-OBS com VOCP/VWP foi descrita uma metodologia de análise de desempenho simples que mostra a vantagem de se empregar caminhos ópticos virtuais VOCP/VWP considerando os efeitos da MAI. Também foi descrita uma metodologia que ilustra a relação entre os atrasos que ocorrem na rede e o tempo de agregação no nó de borda da rede. Os principais resultados mostram que a probabilidade de perdas de rajadas e a latência no roteador de borda diminuem à medida que ocorre o aumento do número de códigos OOC em redes WDM/OCDM. Porém, existe a limitação de aumento do número de códigos OOC em função dos efeitos da MAI. Os resultados da análise do desempenho da rede em função dos atrasos mostram que as redes WDM/OCDM apresentam um tempo de utilização dos canais virtuais aproximadamente constante comparado com o tempo de utilização crescente das redes WDM. Com relação à re-utilização dos canais disponíveis, que representa uma otimização dos recursos, observou-se que a re-utilização de canais é maior nas redes WDM/OCDM comparada com redes WDM em função do maior número de canais disponíveis. Uma análise global do emprego da camada de transporte WDM/OCDM em redes WR-OBS mostra que a utilização de canais baseados em VOCP/VWP diminui a probabilidade de perdas de rajadas e também diminui a latência das rajadas.

Capítulo 4

Análise de OXCs WDM/OCDM

Neste capítulo é realizado um estudo da utilização de comutadores ópticos (OXC) WDM/OCDM que comutam comprimentos de onda e códigos ópticos. O intuito é desenvolvimento de um modelo matemático do OXC WDM/OCDM que considere os efeitos da MAI em função dos parâmetros dos códigos ópticos.

4.1 Introdução

O desenvolvimento da tecnologia OCDM propiciou sua aplicação em redes roteadas por códigos ópticos [4.1], redes que utilizam caminhos ópticos virtuais VOCP/VWP [4.2] e redes comutadas por rajadas OBS [4.3][4.4]. Nas redes ópticas VOCP/VWP o tráfego é escoado por meio de caminhos ópticos virtuais que são comutados ao longo da rede óptica. Esta comutação pode ser realizada por meio da comutação somente dos comprimentos de onda. Neste caso, os comprimentos de onda se comportam como troncos que transportam canais baseados em códigos e os comutadores são denominados OXCs WDM. A comutação também pode ser realizada por meio de comprimentos de onda e códigos ópticos. Neste caso os comutadores são denominados OXCs WDM/OCDM.

Os OXCs WDM vêm sendo largamente estudados e o seu desempenho depende basicamente do tipo de tecnologia empregada na matriz de comutação. Atualmente, as principais tecnologias utilizadas são os MEMs e AWG [2.9][2.11]. Os OXCs WDM

consistem basicamente de demultiplexadores que realizam a separação dos comprimentos de onda que chegam até o OXC e um comutador óptico que realizá a conexão entre uma porta de entrada e uma determinada porta de saída para o comprimento de onda, de acordo com a determinação do controle da rede. Após esta conexão os comprimentos de onda são multiplexados novamente de acordo com a rota estabelecida. Assim, verifica-se o emprego da seletividade com relação ao comprimento de onda para efetuar a distinção das informações transmitidas.

Por outro lado, nos OXCs WDM/OCDM os caminhos ópticos, baseados em códigos ópticos transportados em cada comprimento de onda, são decodificados por meio de um conjunto de correlacionadores ópticos. Desta forma o resultado de cada correlação óptica está relacionada com a porta de entrada na matriz óptica de comutação. Na matriz óptica de comutação será definida a porta de saída do sinal. Após a definição do destino do sinal, ocorre a codificação, por meio do código definido, para estabelecer o caminho óptico até o próximo roteador. Este princípio de roteamento vem sendo empregado nos modelos encontrados na literatura [4.5] [4.6] [4.18] [2.38]. Em uma rede óptica WDM/OCDM não é necessariamente obrigatório que todos os nós estejam equipados com OXCs WDM/OCDM. Desta forma, o dimensionamento do número necessário de cada tipo de OXC deve ser realizado para obtenção de uma rede viável tanto economicamente como em termos de desempenho. Portanto, o estudo da atribuição dos nós que serão equipados com OXCs WDM e OXCs WDM/OCDM é de extrema importância.

Neste contexto, o objetivo deste capítulo é realizar a modelagem do OXC WDM/OCDM bem como analisar a sua aplicação em redes ópticas que utilizam a tecnologia OCDM como camada de transporte. O restante deste capítulo está organizado da seguinte forma. Na Seção 4.2 é ilustrada a arquitetura do OXC WDM/OCDM. Na Seção 4.3 é desenvolvido o modelo matemático do OXC WDM/OCDM. Na Seção 4.4 são apresentados os principais resultados numéricos. Finalmente, na Seção 4.4 são discutidas as principais conclusões.

4.2 OXC WDM/OCDM

A informação transportada em redes ópticas WDM/OCDM é roteada por meio de comutadores ópticos (OXC) WDM/OCDM que são seletivos em comprimentos de onda e códigos ópticos. A literatura ilustra alguns OXC WDM/OCDM [2.38][4.3][4.5][4.18][4.27] com capacidade de efetuar a comutação e o roteamento de canais ópticos baseados em comprimento de onda e códigos ópticos. A Fig. 4.1 ilustra uma arquitetura generalizada de um OXC que apresenta as características dos OXCs descritos em [2.38][4.3][4.5][4.18][4.27].

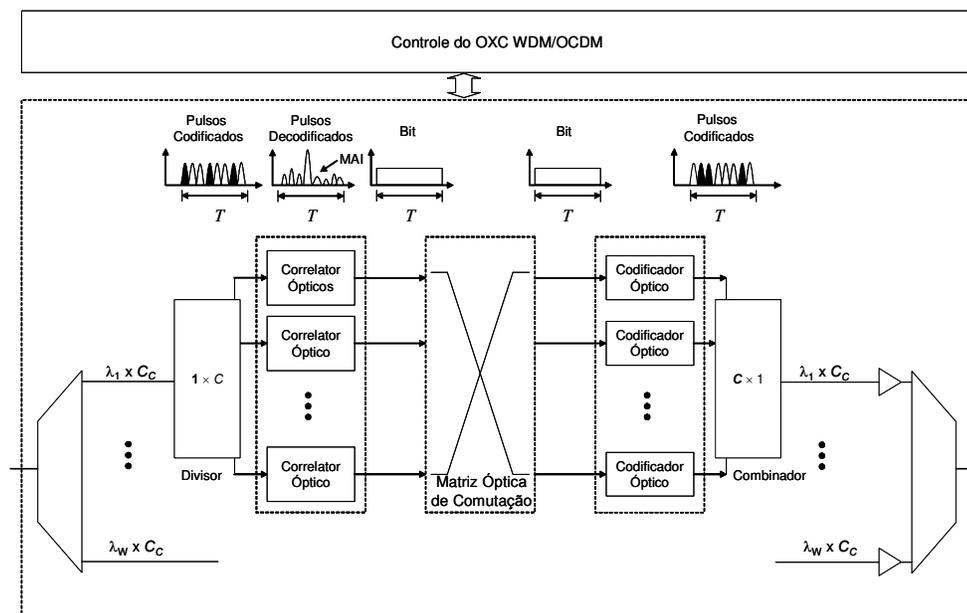


Fig. 4.1. Arquitetura generalizada de um OXC WDM/OCDM

Conforme ilustra a Fig. 4.1 a arquitetura do OXC WDM/OCDM é composta por demultiplexador de comprimento de onda, divisor de potência óptica, correlacionador óptico, comutador óptico, codificador óptico, combinador de potência óptica e multiplexador de comprimento de onda. Para cada comprimento de onda é utilizado um divisor de potência óptica, o qual guia os códigos ópticos em cada comprimento de onda até os correlacionadores ópticos. Cada correlacionador óptico é ajustado para decodificar um código óptico específico de acordo com a porta de entrada na matriz de comutação

óptica. Por outro lado, cada correlacionador possui uma chave óptica com nível de limiar para efetuar o condicionamento do sinal. Portanto, o sinal recebido correspondendo a um bit “1” ou “0” resultará em um pico de auto-correlação ou um nulo, respectivamente. O sinal resultante será comutado até a determinada porta de saída por meio da comutação óptica da matriz de comutação. O sinal resultante na saída da matriz óptica será codificado por meio de um codificador óptico de acordo com o código óptico determinado em função da rota óptica estabelecida. No processo de codificação pode ser empregado o mesmo código anterior ou um novo código, assim este dispositivo também é denominado de conversor de códigos ópticos [4.14]. Todos os sinais codificados são combinados por meio do combinador de potência óptico resultando em um novo sinal no mesmo comprimento de onda em que o sinal entrou no OXC. Este comprimento de onda é multiplexado com os demais comprimentos de onda por meio do multiplexador óptico e todos os sinais são encaminhados até o próximo nó óptico. O emprego de C códigos por comprimento de onda resultará na MAI que pode implicar em erros de bits no processo de descorrelação óptica. Além disso, existe a probabilidade de mais de um sinal óptico ter a mesma porta de saída da matriz óptica como destino. Desta forma também ocorreria a geração de erro. Neste contexto, será ilustrada a modelagem matemática do comutador OXC considerando códigos OOC.

4.3 Modelagem Matemática

O objetivo desta análise é investigar o sinal óptico após o processo de demultiplexação. Desta forma o foco será o sinal óptico composto por um comprimento de onda e C códigos ópticos. A modelagem do OXC WDM/OCDM é baseado na determinação da BER que ocorre durante o processo de descorrelação no correlacionador óptico e no cálculo da taxa de erro de pacotes (*Packet Error Rate, PER*) na saída do comutador óptico. A BER ocorre como consequência da MAI e a PER é causada pela probabilidade de mais de um código possuir como destino a mesma porta de saída do comutador óptico em um determinado instante de tempo. Para determinar o desempenho do OXC WDM/OCDM será considerado que todos os códigos que chegam até o OXC

possuem a mesma potência, taxa de transmissão e formato de modulação. A *BER* na saída do decodificador pode ser escrita como:

$$BER = P_{(0)}P(error|0) + P_{(1)}P(error|1) \quad (4.1)$$

sendo $P_{(0)}$ a probabilidade de ocorrer um bit “0” e $P_{(1)}$ a probabilidade de ocorrer um bit “1”. Admite-se que essas probabilidades sejam $P_{(0)} = P_{(1)} = 1/2$. O termo $P(error|1)$ representa a probabilidade de ocorrer um erro na detecção de um bit “1”, quando ocorre a sobreposição de *chips* de outros códigos e excedem o valor de limiar (*Th*). $P(error|1)$ é dado por:

$$P(error|1) = \int_{-\infty}^{Th} P(Z)dZ, \quad (4.2)$$

Na saída do correlacionador óptico, o sinal obtido é representado por meio da variável aleatória Z que possui função densidade de probabilidade $P_Z(Z)$ [4.15]:

$$Z = \frac{1}{T_C} \int_0^T r(t)C_1(t)dt = d^{(1)}w + I_1 + N_q, \quad (4.3)$$

na qual T é o período do bit, $T_C = T/L$, $r(t)$ é o sinal recebido, C_1 é um código OOC e w é o peso do código e, $d^{(1)}$ representa os bits detectados neste canal que podem ter valores “1” e “0” com igual probabilidade. Nesta equação $d^{(1)}w$ representa o sinal desejado, $I_1 = \sum_{n=2}^C I_n^{(1)}$ representa a MAI sendo I_1 a soma da interferência proveniente dos $(C - 1)$ outros códigos, N_q é o ruído quântico com média zero e variância dada por σ_N^2 . O ruído quântico apresenta um valor médio igual a 0,01. Cada interferência $I_n^{(1)}$ é uma variável aleatória com média $\mu_{I_n^{(1)}}$ e variância $\sigma_{I_n^{(1)}}^2$. Assumindo que $I_n^{(1)}$ são independentes entre si e identicamente distribuídos, a média e a variância da variável aleatória Gaussiana Z são representadas por $d^{(1)}w + (C - 1)\mu$ e $(C - 1)\sigma^2 + \sigma_N^2$, respectivamente. Esta média e

variância são dadas por $\mu = \mu_{I_n^{(n)}}$ e $\sigma^2 = \sigma_{I_n^{(n)}}^2$ para $2 \leq n \leq C$. Desta forma, a função densidade de probabilidade de Z é dada por [4.14]:

$$P_Z(Z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_Z^2}} \exp\left(-\frac{(Z - \mu_Z)^2}{2\sigma_Z^2}\right) \quad (4.4)$$

sendo σ_Z^2 a variância e μ_Z média da variável aleatória Z .

De maneira similar, $P(\text{error}|0)$ representa a probabilidade de ocorrer um erro na detecção de um bit “0”:

$$P(\text{error}|0) = \int_{Th}^{\infty} P(Z)dZ \quad (4.5)$$

Os cálculos a seguir consideram que há sincronismo entre os sinais de interferência dos outros códigos OOC. Como o sincronismo representa o cenário com maior MAI, a avaliação apresentada neste trabalho é relativa a um limite superior de desempenho do sistema. Para esta condição obtém-se $\mu_Z = w^2/2L$ e $\sigma_Z^2 = \mu_Z(1 - \mu_Z)$ [4.26]. Finalmente, a *BER* pode ser escrita como:

$$BER = \frac{1}{4} \operatorname{erfc} \left(\frac{Th - (C-1) \frac{w^2}{2L}}{\sqrt{2 \left[\sigma_N^2 + (C-1) \frac{w^2}{2L} \left(\frac{1}{3} - \frac{w^2}{4L} \right) \right]}} \right) + \frac{1}{4} \operatorname{erfc} \left(\frac{w + (C-1) \frac{w^2}{2L} - Th}{\sqrt{2 \left[\sigma_N^2 + (C-1) \frac{w^2}{2L} \left(\frac{1}{3} - \frac{w^2}{4L} \right) \right]}} \right) \quad (4.6)$$

A função erro complementar é definida como:

$$\operatorname{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^{\infty} \exp(-y^2) dy \quad (4.7)$$

O valor de limiar óptico (Th) do dispositivo de decisão no correlacionador óptico apresenta forte influência no valor da BER . Na literatura encontra-se a premissa de ajustar o valor de limiar igual ao peso do código [4.26]. O principal resultado neste caso é que não haverá erros de decisão quando um bit “1” for transmitido. Esta metodologia funciona bem quando a MAI é baixa em comparação com o peso do código, pois verifica-se que a probabilidade de erro associada com a transmissão de um bit “0” aumenta quando as interferências no canal óptico aumentam. Neste caso, o valor de limiar pode ser aumentado além do valor do peso do código. Neste trabalho será considerada a utilização do valor de limiar otimizado para obtenção da menor BER possível no OXC. O valor de limiar otimizado é obtido de forma iterativa pela satisfação da condição $P_{(0)}P(error|0) = P_{(1)}P(error|1)$ que resulta em $Th_{opt} = w/2 + (C - 1)\mu_z$. O valor otimizado de limiar depende de parâmetros do código como peso e comprimento e também do número de códigos que estão sendo recebidos no correlacionador. Os parâmetros dos códigos podem ser obtidos por meio do controle da rede e o número de códigos que estão sendo recebidos no correlacionador pode ser determinado por meio da medição da potência recebida. Atualmente é possível monitorar e ajustar o valor ótimo de limiar utilizando receptores de baixo custo [4.26].

A probabilidade de perdas de pacotes, (*Packet Error Rate, PER*) média em um comprimento de onda na saída do OXC WDM/OCDM considerando que a probabilidade de i pacotes transportados por C códigos OOC distintos apresentarem a mesma porta de saída do comutador óptico possui uma distribuição de probabilidade binomial [3.46] e $\hat{\rho}$ é a utilização de enlace de cada caminho óptico:

$$PER = \sum_{i=1}^C \binom{C}{i} \hat{\rho}^i (1 - \hat{\rho})^{C-i} P_{BER}(i) \quad (4.8)$$

Com o intuito de obter o pior caso considera-se que os pacotes com mesma porta de saída do comutador óptico estão sincronizados. A taxa de erro em cada pacote em função da interferência da MAI é calculada através de:

$$P_{BER} = 1 - (1 - BER)^{packet} \quad (4.9)$$

sendo que *packet* é o comprimento médio dos pacotes de dados em bytes. Desta forma, a *PER* é escrita como:

$$PER = \sum_{i=1}^C \binom{C}{i} \hat{\rho}^i (1 - \hat{\rho})^{C-i} [1 - (1 - BER)^{packet}] \quad (4.10)$$

Com intuito de verificar o desempenho do OXC considerando a variação de taxa de transmissão em função do número de códigos por comprimento de onda será empregada a métrica da vazão (*throughput*). A vazão em um comprimento de onda considerando *C* códigos OOC transmitindo simultaneamente é dada por [4.28]:

$$\beta = \sum_{C=1}^{\infty} CP_C(C) f_C(C) \quad (4.11)$$

sendo $f_C(C)$ a distribuição de probabilidade da taxa de solicitação de pacotes. Esta distribuição apresenta características de um processo de Poisson com taxa de solicitação média de pacotes λ [2.44]:

$$f_C(C) = \frac{(\lambda T)^C}{C!} e^{-\lambda T} \quad (4.12)$$

O tráfego oferecido a cada comprimento de onda é dado por λT e $P_C(C)$ representa a probabilidade de um pacote ser recebido, comutado e transmitido pelo OXC sem erro:

$$P_C(C) = 1 - PER(C) \quad (4.13)$$

A vazão média normalizada por caminho óptico virtual, ou seja, por código OOC é dada por:

$$V_{OXC} = \frac{\beta \times B}{C} \quad (4.14)$$

sendo B a taxa de transmissão por comprimento de onda. Portanto, a vazão média normalizada por caminho óptico virtual, escrita como:

$$V_{OXC} = \frac{B}{C} \left[\sum_{C=1}^{\infty} C(1 - PER(C)) \frac{(\lambda T)^C}{C!} e^{-\lambda T} \right] \quad (4.15)$$

4.4 Resultados

Inicialmente, para ilustrar o desempenho do OXC WDM/OCDM será analisada a BER na saída do decodificador. A Fig. 4.2 ilustra a BER em função do número de códigos OOC em um comprimento de onda. Com o intuito de ilustrar a sensibilidade à variação do valor de limiar será considerada a situação de limiar otimizado e de desvio de 50 % do valor de limiar otimizado. A BER em função do número de códigos OOC ilustrada na Fig. 4.2 é obtida por meio de (4.6).

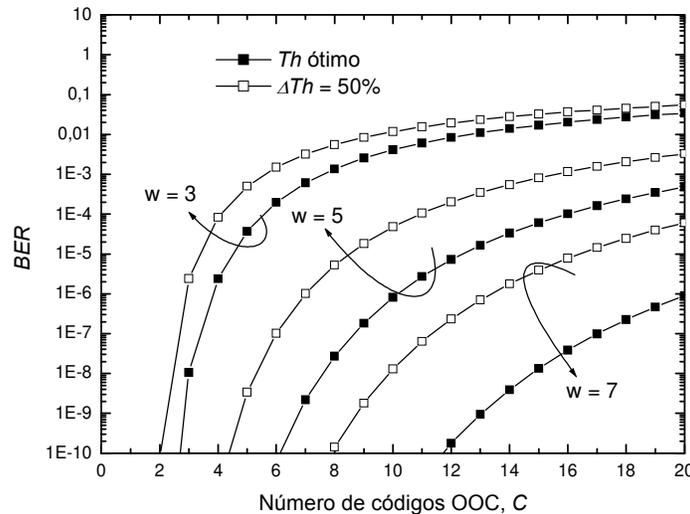


Fig. 4.2. BER na saída do correlacionador em função do número de códigos OOC.

Por meio da Fig. 4.2 se verifica que a *BER* aumenta em função do aumento do número de códigos OOC. Este efeito ocorre em função da MAI que degrada o sistema, por outro lado o aumento do peso do código apresenta efeito positivo na diminuição da *BER*. O aumento do peso do código resultará no aumento do valor de correlação no decodificador. Para ilustrar a influência do peso do código na *BER* se verifica que considerando um valor de limiar otimizado para 12 códigos a *BER* obtida é aproximadamente 7×10^{-3} , 8×10^{-6} , 2×10^{-10} para códigos com peso 3, 5 e 7, respectivamente. Outro resultado ilustrado na Fig. 4.2 é a sensibilidade com relação ao valor de limiar, assim o emprego de valores de limiar não-otimizados pode degradar o desempenho do OXC.

A Fig. 4.3 ilustra a *PER* em função do número de códigos OOC em um comprimento de onda na saída do OXC considerando um comprimento dos pacotes de dados de 1500 bytes e uma utilização de enlace que representa um fluxo contínuo de transmissão de dados, ou seja, $\hat{\rho} = 1$. A *PER* em função do número de códigos OOC ilustrada nas Fig. 4.3 é obtida por meio de (4.10), considerando a *BER* obtida por meio de (4.6).

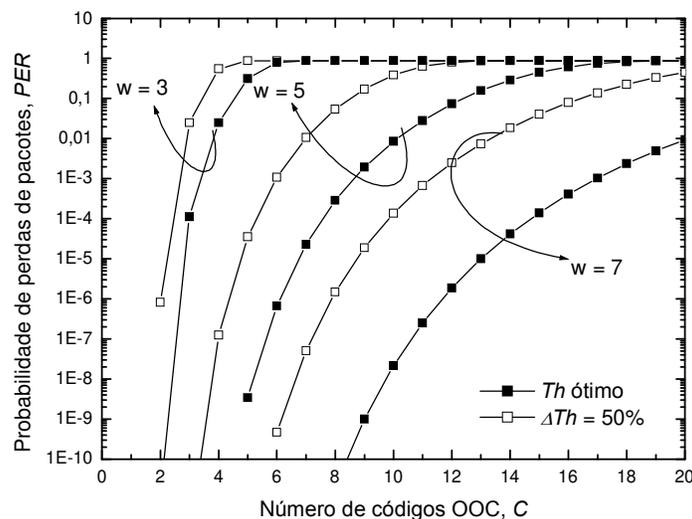


Fig. 4.3. *PER* na saída do comutador óptico em função do número de códigos OOC.

A Fig. 4.3 ilustra o aumento da *PER* em função dos efeitos da MAI quando o número de códigos OOC aumenta. O impacto do valor de limiar otimizado pode ser observado pela limitação imposta ao número de códigos OOC suportados com um determinado valor de *PER* aceitável. Por exemplo, para manter uma *PER* igual a 1×10^{-8} o número de códigos

OOO suportados é 2, 5 e 9 para os pesos 3, 5 and 7, respectivamente, considerando o valor ótimo de limiar. Por outro lado, o número máximo de códigos suportados para a mesma *PER* utilizando um valor de limiar com 50 % do valor otimizado de limiar é 1, 3 e 6 para os pesos 3, 5 and 7, respectivamente.

A Fig. 4.4 ilustra o efeito do comprimento dos pacotes transmitidos na *PER*. Neste estudo é considerado o fluxo contínuo de dados, ou seja, $\hat{\rho} = 1$, e considera-se o nível de limiar otimizado. A *PER* em função do número de códigos OOC ilustrada nas Fig. 4.4 é obtida por meio de (4.10), considerando a *BER* obtida por meio de (4.6).

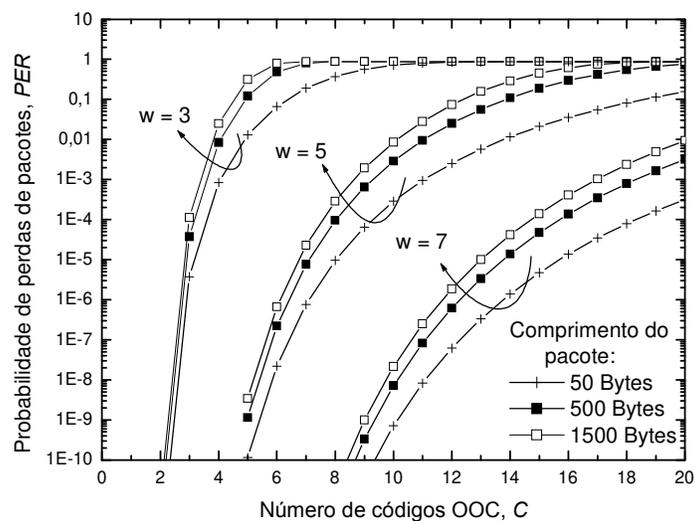


Fig. 4.4. *PER* na saída do comutador óptico em função do número de códigos OOC.

A Fig. 4.4 ilustra os efeitos do comprimento dos pacotes de dados na *PER* em função do número de códigos. Os pacotes com maior comprimento possuem maior *PER* em função da maior probabilidade de se sobreporem a outros pacotes em códigos OOC distintos.

Os resultados obtidos ilustram o desempenho de um OXC WDM/OCDM considerando os efeitos do número de códigos ópticos por comprimento de onda, peso do código e nível de limiar. Estes resultados mostram que tanto o valor otimizado de limiar como o elevado peso dos códigos diminui a *BER* no processo de correlação. A utilização de códigos com elevado peso implica na diminuição da *BER* e da *PER* em função do aumento da auto-correlação. Por outro lado, foi ilustrado que aumento do comprimento dos pacotes

transmitidos resulta no aumento da *PER*. Este efeito ocorre função do aumento da probabilidade de sobreposição dos pacotes transportados por códigos distintos.

A Fig. 4.5 ilustra a vazão em função do número de códigos OOC considerando pacotes com comprimento de 1500 bytes, utilização de enlace igual a 0,1, 0,4 e 0,8, e códigos com peso 3, 5 e 7. Os demais dados empregados são os mesmos utilizados para obtenção da Fig. 4.4. A vazão em função do número de códigos OOC ilustrada na Fig. 4.5 é obtida por meio de (4.15) empregando (4.13) e (4.10).

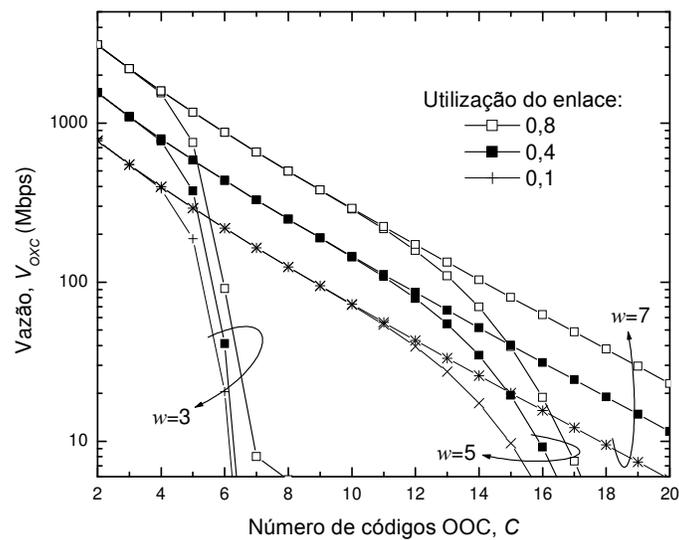


Fig. 4.5. Vazão (Mbps) em função do número de códigos OOC.

Por meio da Fig. 4.5 se verifica que a vazão por códigos diminui em função do aumento do número de códigos. Esta diminuição é suave até o ponto em que o aumento do número de códigos implica no elevado aumento da MAI. Assim, se observa que a diminuição da vazão é suave até aproximadamente 4 e 12 códigos para códigos com peso 3 e 5, respectivamente. Por outro lado, para códigos com peso igual a 7 a vazão é linear até 20 códigos que representa o limite do número de códigos analisados. Com relação ao peso dos códigos se observa que o aumento do peso influencia no aumento da vazão em função da diminuição da *PER* como foi ilustrado anteriormente. Este comportamento também é verificado com relação a utilização do enlace, pois o aumento da utilização implica no aumento da *PER*.

O estudo do comportamento da vazão ilustra que esta métrica deve ser empregada como ferramenta de análise para determinar o dimensionamento do número de códigos empregados por comprimento de onda. De uma forma geral os resultados obtidos podem ser empregados no projeto e otimização de OXCs WDM/OCDM considerando os parâmetros dos códigos ópticos.

4.5 Sumário

Neste capítulo foi realizada uma análise de redes ópticas WDM/OCDM que empregam *optical crossconnects* (OXC) que comutam comprimentos de onda e códigos ópticos. Nestes OXCs os caminhos ópticos são demultiplexados inicialmente em função dos comprimentos de onda, assim em cada demultiplexador haverá um determinado número de comprimentos de onda e em cada comprimento de onda haverá C códigos ópticos. Os códigos ópticos em cada comprimento de onda são decodificados por meio de um conjunto de correlacionadores ópticos, desta forma o resultado de cada correlação óptica está relacionada com a porta de entrada na matriz óptica de comutação. Na matriz óptica de comutação será definida a porta de saída do sinal. Após definir o destino do sinal ocorre a codificação por meio do código definido para estabelecer o caminho óptico baseado em códigos ópticos até o próximo roteador. Os resultados obtidos ilustram o desempenho de um OXC WDM/OCDM considerando os efeitos do número de códigos ópticos por comprimento de onda, peso do código e nível de limiar. Estes resultados mostram que tanto o valor otimizado de limiar como o elevado peso dos códigos diminui a BER no processo de correlação. A utilização de códigos com elevado peso implica na diminuição da BER e da PER em função do aumento da auto-correlação. Por outro lado, foi ilustrado que aumento do comprimento dos pacotes transmitidos resulta no aumento da PER . Este efeito ocorre função do aumento da probabilidade de sobreposição dos pacotes transportados por códigos distintos.

Capítulo 5

Efeitos da PMD em Redes Ópticas Híbridas WDM/OCDM

Neste capítulo é realizado um estudo sobre os efeitos da PMD em redes híbridas WDM/OCDM. Inicialmente é feita uma investigação sobre os efeitos da dispersão em redes híbridas WDM/OCDM sendo observado que existem modelos para análise e técnicas de compensação para a dispersão cromática, porém ainda não foram realizados estudos suficientes sobre os efeitos da PMD nas redes WDM/OCDM. Assim, é realizada uma análise dos efeitos da PMD em redes ópticas WDM/OCDM empregando o roteamento e atribuição de caminhos ópticos. Por outro lado, apresenta-se um modelo analítico para análise dos efeitos da PMD em rotas ópticas WDM/OCDM.

5.1 Introdução

As redes ópticas WDM que utilizam comprimentos de onda para roteamento e comutação apresentam a vantagem de manterem o sinal no domínio óptico ao longo de sua transmissão [5.1][5.2]. Em função desta característica, este tipo de rede óptica apresenta a possibilidade do escoamento do crescente tráfego de dados. Inicialmente a análise de redes ópticas WDM consideravam as fibras ópticas, bem como os dispositivos ópticos, como OXCs, filtros ópticos, amplificadores EDFA e conversores de comprimento de onda como

sendo ideais [5.3]. Desta forma, em função desta consideração empregavam-se metodologias de análise de desempenho que utilizavam modelos de fibras e dispositivos idealizados. Dentre as metodologias de análise empregadas pode-se citar as técnicas analíticas [5.4][5.5] e as técnicas numéricas de roteamento e atribuição de comprimentos de onda (*Routing and Wavelength Assignment*, RWA) [5.6]. Porém, a necessidade da obtenção de modelos teóricos que fornecessem uma análise de desempenho mais próxima da realidade levou à inserção das características das fibras e dispositivos ópticos nos modelos utilizados [5.7][5.8]. De maneira similar, as redes ópticas híbridas WDM/OCDM [5.9] também mantém o sinal no domínio óptico ao longo da sua transmissão por meio da formação de caminhos ópticos virtuais baseados em comprimento de onda e códigos ópticos [5.10]. Na análise de desempenho deste tipo de rede também se utilizam técnicas analíticas [5.11] e numéricas [5.12] sem considerar as restrições físicas impostas pelas fibras e dispositivos ópticos que compõem a rede. Porém, em função do alto potencial de utilização das redes híbridas WDM/OCDM é necessária a realização de análise de desempenho destas redes considerando modelos de fibras e dispositivos próximos da realidade.

Assim, o objetivo deste capítulo é estudar os efeitos da PMD nas redes ópticas WDM/OCDM. A escolha do estudo dos efeitos da PMD baseou-se na dificuldade de sua compensação, que ocorre em virtude de sua natureza aleatória [5.13]. O restante deste capítulo está organizado da seguinte forma. Na Seção 5.2 é ilustrado um estudo sobre o impacto da dispersão em redes ópticas. Na Seção 5.3 realiza-se uma análise dos efeitos da PMD nas redes WDM/OCDM empregando RCA baseado em algoritmos genéticos. Na Seção 5.4 realiza-se uma análise dos efeitos da PMD e da MAI em rotas ópticas WDM/OCDM empregando modelagem analítica. Finalmente, na Seção 5.5 são discutidas as principais conclusões.

5.2 Restrições Físicas em Redes Ópticas

As restrições físicas podem ser classificadas como lineares e não-lineares [5.14]. Os efeitos lineares são independentes do nível de potência injetado na fibra e afetam os canais

ópticos de forma individual. Pode-se citar como exemplo deste tipo de restrição física a emissão espontânea de amplificador ASE, PMD e dispersão cromática [5.15]. Por outro lado, os efeitos não-lineares dependem do nível de potência injetado na fibra e podem induzir a interferência entre os canais ópticos. Entre os efeitos não-lineares pode-se citar a automodulação de fase (*Self Phase Modulation*, SPM), modulação cruzada de fase (*Cross Phase Modulation*, XPM), e a mistura de quatro ondas (*Four-Wave Mixing*, FWM) [5.16]. Um ótimo estudo sobre não-linearidades em fibras ópticas pode ser encontrado em [5.14].

As redes ópticas WDM apresentam o seu desempenho limitado em função dos efeitos da dispersão cromática [5.17], principalmente redes que utilizam enlaces longos e elevadas taxas de transmissão. Porém, as técnicas de compensação de dispersão cromática têm sido utilizadas com sucesso no aumento do comprimento dos enlaces. Dentre as técnicas de compensação de dispersão podem-se destacar as técnicas de gerenciamento de dispersão que utilizam enlaces com fibras com compensação de dispersão (*Dispersion-Compensating Fiber*, DCF) e compensação utilizando redes de Bragg [5.18]. Nas redes híbridas WDM/OCDM os efeitos da dispersão cromática podem ser ainda mais degradantes do que nas redes WDM, pois a taxa efetiva de transmissão no enlace é a taxa de *chips* transmitidos, sendo a taxa de *chips* dada pela taxa de transmissão multiplicada pelo comprimento do código óptico transmitido. Em função destas características apresentadas pelas redes híbridas WDM/OCDM foram desenvolvidos alguns estudos com intuito de analisar os efeitos da dispersão cromática e minimizar seu impacto sobre o desempenho da rede.

Um dos primeiros estudos realizados neste sentido foi o estudo experimental ilustrado em [5.19] empregando códigos coerentes e utilizando a compensação da dispersão cromática por meio de fibras DCF, foi demonstrada a transmissão de códigos ópticos com comprimento de 31 e 63 *chips* sobre um enlace de 2,5 km de fibra DCF.

Em [5.20] foram investigados os efeitos da dispersão de primeira e segunda ordem e de parâmetros como duração de tempo do *chip*, descasamento de fase entre codificador e decodificador e largura de feixe da fonte óptica na auto-correlação do sinal recebido. A metodologia utilizada se baseou no formalismo analítico da propagação de pulso proposto em [5.21]. Na análise dos resultados foram empregados códigos com 16 *chips* de comprimento e duração de *chip* de 10 ps. Os resultados obtidos indicam que para evitar a

interferência entre *chips*, o alargamento temporal máximo permitido de um *chip* deve ser o período de um terço de *chip*.

Em [5.23] foram apresentadas as limitações causadas pela dispersão cromática em sistemas OCDM que empregam códigos coerentes com 8 *chips* de comprimento numa taxa de 10 Gbps. Nestes sistemas poderiam ser obtidos enlaces com comprimento um pouco maior que 50 km de fibra *standard* sem a presença de erros no sinal transmitido. Porém, a distância de 100 km ainda era o limite em decorrência da dispersão cromática.

É importante ressaltar que os códigos ópticos coerentes são menos sensíveis aos efeitos da dispersão quando comparados com os códigos ópticos não-coerentes. O emprego da compensação de dispersão utilizando fibras DCF vem sendo empregado com sucesso em redes OCDM como é mostrado em [5.24]. Assim, é possível obter enlaces com aproximadamente 100 km de comprimento assegurando uma taxa de erro de bit de 10^{-9} .

Em [5.25] foram analisados efeitos da dispersão em sistemas OCDM coerentes considerando uma taxa de transmissão de 1 Gbps e *chips* com período de 3, 5 e 7 ps. Neste estudo foi demonstrado que para estes períodos de *chips* a distância máxima alcançada mantendo uma taxa de erro de bit de 10^{-9} é de 60, 140 e 230 km para fibras convencionais e 370, 800 e 1600 km para fibras DSF. Em [5.26] foram investigados os sistemas que utilizam a detecção tipo SIK. O principal resultado obtido ilustra que um aumento no índice de dispersão cromática de 0,1 para 0,3 ps/nm/km causa uma penalidade de 6 dB no sistema. Este efeito acarreta uma diminuição no número de usuários de 14 para 10 para manter uma BER de 10^{-9} .

Em função da revisão bibliográfica ilustrada sobre os estudos dos efeitos da dispersão cromática em redes que empregam a tecnologia OCDM, que podem ser estendidos para o caso de redes híbridas WDM/OCDM, verifica-se que existem metodologias de análise e técnicas de compensação eficientes que diminuem os seus efeitos. Estas conclusões não podem ser estendidas para o caso da PMD, principalmente em virtude da dificuldade de determinar precisamente seus valores e também em função da dificuldade de sua compensação [5.28]. A PMD apresenta estas características em virtude de sua natureza dinâmica causada por esforços ou trações externas aplicadas à fibra [5.29]. Um estudo desenvolvido em [5.30] mostra os efeitos da PMD em sistemas OCDM coerentes e ilustra resultados que mostram que um número máximo de 20 usuários é suportado com uma BER

de 10^{-9} num enlace de 6 km empregando códigos com comprimento de 129 *chips*. Os resultados também mostram que os efeitos da PMD dependem do estado inicial da polarização injetada na fibra.

Em [5.12] foi mostrado um estudo sobre a limitação do comprimento do enlace em função do número de códigos ópticos, porém os resultados preliminares obtidos não foram utilizados nas simulações de análise de desempenho da rede. Em [5.44] foi realizado um estudo dos efeitos das restrições físicas das fibras ópticas em redes WDM e WDM/OCDM, porém foi considerado somente códigos OOC com peso igual a 3. Portanto não foi analisada a variação dos parâmetros dos códigos OOC e o impacto desta variação no desempenho da rede. Em [5.45] também foram investigados os efeitos das restrições físicas das fibras ópticas sobre códigos ópticos não-coerentes. Neste estudo, verificou-se que a PMD apresenta o maior impacto sobre o desempenho da rede comparada com outras restrições físicas como FWM. Neste contexto, verifica-se que ainda não existe um estudo detalhado das limitações impostas pela PMD em redes WDM/OCDM. Na seção seguinte serão ilustrados os princípios teóricos sobre a PMD.

5.2.1 Polarização por Dispersão Modal (PMD)

Em fibras monomodo o modo fundamental é composto por dois modos degenerados, ou seja, dois modos que possuem as constantes de propagação longitudinal iguais, porém com planos de polarização ortogonais [5.17]. Desta forma, pode-se representar arbitrariamente estas polarizações como polarização vertical (HE_{11}^y) e polarização horizontal (HE_{11}^x). Entretanto esta igualdade nas constantes de propagação é considerada verdadeira apenas para fibras ópticas ideais que apresentem simetria circular perfeita. Neste caso, qualquer polarização injetada na fibra se propagaria de forma inalterada através do enlace óptico. Porém, as fibras reais apresentam imperfeições causadas por pressão lateral, núcleos com geometria não circular, além de variações no perfil de índice de refração [5.31]. Estas imperfeições quebram a simetria circular da fibra e acabam com a degenerescência dos dois modos, desta forma estes modos irão propagar-se com diferentes velocidades de fase e a diferença entre seus índices de refração efetivos é denominada

birrefringência [5.32]. Assim, se a luz lançada na fibra excitar as duas polarizações do modo fundamental, então, devido às imperfeições da fibra, um dos modos irá propagar-se com atraso de fase em relação ao outro. Quando esta diferença de fase é um número inteiro múltiplo de 2π , os modos irão reproduzir o estado de polarização inicial que foi injetado na entrada da fibra. Valores típicos de birrefringência de uma fibra de seção circular podem variar desde 1×10^{-8} a 1×10^{-3} [5.32]. As duas polarizações ortogonais que constituem o modo fundamental possuem diferentes constantes de propagação ilustradas por β_x e β_y e diferentes atrasos de grupo, representados por τ_{gx} e τ_{gy} . O atraso por quilômetro, $\Delta\tau_g$, entre as duas polarizações ortogonais $\Delta\tau_g = \tau_{gx} - \tau_{gy}$ é chamado de atraso de grupo diferencial (*Differential Group Delay*, DGD). O DGD é a medida que representa a magnitude da PMD, e é dada em picossegundos [5.33]. A PMD apresenta característica estocástica em função da natureza aleatória do acoplamento que é induzido pelo comprimento aleatório da birrefringência [5.34] e alguns dados experimentais indicam que a PMD em fibras convencionais é menor que $1 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$, já em fibras de polarização mantida de alta birrefringência é maior que $1 \text{ ns}/\sqrt{\text{km}}$ [5.32]. A DGD entre os principais estados de polarização varia com o tempo e comprimento de onda, induzindo um fenômeno conhecido como PMD de segunda ordem que introduz distorção adicional no sinal [5.35]. Para fibras com alto grau de acoplamento aleatório a DGD possui uma distribuição estatística Maxwelliana [5.29]. A PMD em transmissões analógicas causa a distorção do sinal, conhecida como distorção devido à polarização modal e em transmissões digitais causa o aumento na BER devido à interferência inter-símbolo. Na fibra, existem dois meios de diminuir a PMD, o primeiro é diminuir a assimetria do perfil de índice de refração e perfil de estresse, estes elementos estão relacionados com o processo de fabricação da fibra. O segundo é introduzir o acoplamento controlado dos modos de polarização [3.31]. A Tabela 5.1 ilustra as penalidades causadas pela PMD no comprimento do enlace óptico WDM sem a utilização de compensadores para este tipo de efeito [5.36].

Tabela 5.1. Distância máxima de transmissão devido aos efeitos da PMD.

Taxa (Gbps)	Distância máxima do enlace óptico		
	Até 1990 (1,0 ps/ $\sqrt{\text{km}}$)	Até 2005 (0,5 ps/ $\sqrt{\text{km}}$)	Futuro (0,25 ps/ $\sqrt{\text{km}}$)
10	60	230	781
40	4	14	49

Por meio da Tabela 5.1 verifica-se que a PMD representa uma limitação em sistemas de comunicações ópticas, onde pulsos com pequena duração, ou seja, taxas de transmissão elevadas são transmitidos em enlaces com grande comprimento. Atualmente, verifica-se a existência de compensadores de PMD automáticos que aumentam em até nove vezes o comprimento dos enlaces [5.37]. Observa-se, porém, que a compensação da PMD é muito difícil, principalmente em razão de outros efeitos como dispersão cromática, XPM e SPM que diminuem os efeitos da compensação da PMD. Além disso, o custo dos compensadores ainda é muito elevado [5.28]. Para realizar uma análise aproximada dos efeitos da PMD em redes WDM emprega-se a restrição de que o atraso diferencial médio entre os dois estados ortogonais de polarização do sinal de luz dentro da fibra tem que ser menor que a fração de duração do bit, $T = 1/B$, onde B é a taxa de transmissão [5.15][5.38]. Esta restrição é encontrada na literatura como:

$$B\sqrt{D_{PMD}^2 \times L_O} < a \quad (5.1)$$

sendo D_{PMD} o coeficiente de PMD em cada enlace, L_O é o comprimento de cada enlace de fibra óptica e a é a fração de duração do bit que corresponde ao máximo alargamento temporal tolerado. Neste trabalho, adota-se $a = 0,1$ [5.15].

5.2.2 Efeitos da PMD sobre códigos OOC

No caso de transmissão empregando códigos OOC será transmitida uma *codeword* de comprimento L para cada bit que o transmissor deseja enviar. Assim, a taxa de transmissão de cada usuário será a taxa de transmissão multiplicada pelo comprimento do código

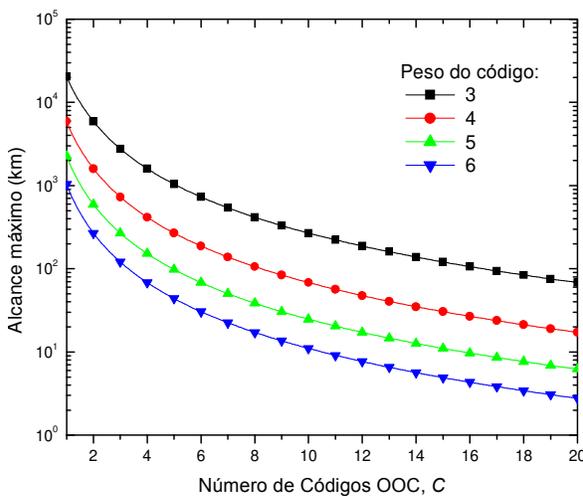
óptico. O comprimento dos códigos OOC é representado em (5.2) e é obtido por meio de (2.6), na qual a cardinalidade dos códigos OOC é indicada:

$$L \geq [C \cdot w \cdot (w-1) + 1] \quad (5.2)$$

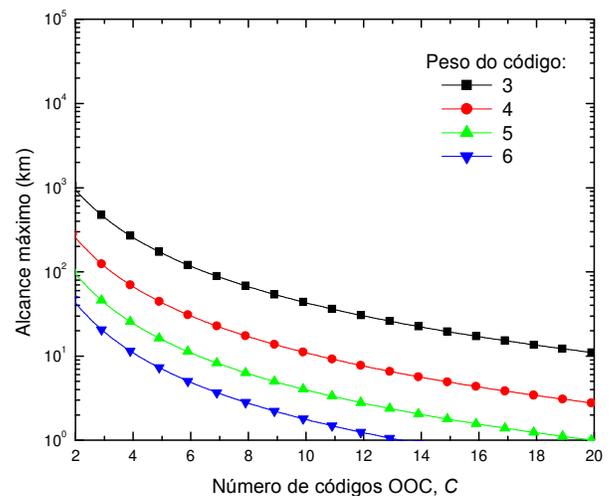
sendo que w representa o peso do código. Manipulando (5.1) e (5.2) obtém-se a restrição física imposta pela PMD em função do número de códigos OOC em cada comprimento de onda:

$$B \times [Cw(w-1) + 1] \times \sqrt{D_{PMD}^2 \times L_O} < a, \quad (5.3)$$

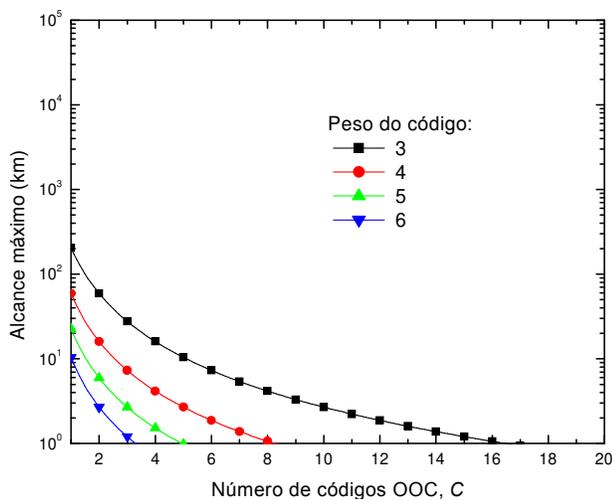
na qual C é o número de códigos OOC por comprimento de onda. A relação entre a distância limitada pela PMD em função do número de códigos por comprimento de onda é ilustrada na Fig. 5.1 para o peso dos códigos ópticos distintos. As taxas de transmissão consideradas são 1,0, 2,5 e 10 Gbps em (a), (b) e (c), respectivamente. As curvas ilustradas na Fig. 5.1 são obtidas por meio de (5.3) considerando D_{PMD} igual a $0,1 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$.



(a)



(b)



(c)

Fig. 5.1. Distância limitada pela PMD em função do número de códigos ópticos. As taxas de transmissão são 1,0, 2,5 e 10 Gbps em (a), (b) e (c), respectivamente.

Através da Fig. 5.1 verifica-se que o alcance máximo dos enlaces diminui em função do aumento do peso, do número de códigos ópticos e da taxa de transmissão. Este comportamento é explicado em função do aumento destes fatores que influenciam no aumento do atraso diferencial médio entre os dois estados ortogonais de polarização do sinal de luz dentro do enlace que tem que ser menor que a fração de duração do *chip*. Desta forma, verifica-se que para alcançar distâncias mais longas devem-se utilizar códigos OOC com menor peso e utilizar a menor taxa de transmissão possível. Além disso, o algoritmo de controle da rede deve administrar a atribuição do número de códigos ópticos por comprimento de onda para evitar a limitação em função da PMD. Porém, deve haver um compromisso entre a distância que o enlace óptico deverá alcançar e o peso do código. Visto que o pico de auto-correlação é igual ao peso do código, assim os efeitos da interferência entre usuários (MAI) dependerão do peso do código. [5.59][5.40].

5.3 Efeitos da PMD em Redes Ópticas WDM/OCDM

Nesta seção ilustram-se os efeitos da PMD em redes WDM/OCDM empregando a técnica numérica conhecida como *Routing Channel Assignmet (RCA)*. Neste caso os canais

são comprimentos de onda e códigos ópticos. Esta técnica provém da técnica RWA na qual somente comprimentos de onda são empregados. Uma boa revisão das técnicas de RWA utilizadas pode ser encontrada em [5.6].

5.3.1 Metodologia de Análise

No RCA utilizado considera-se que as requisições de estabelecimento de ligações entre os nós de origem e destino seguem uma distribuição de Poisson e o tempo de permanência das solicitações possui uma distribuição exponencial com tempo médio ($1/\mu$) de 60 segundos. Foi empregado o roteamento alternativo. Assim a rota para atender cada solicitação é selecionada entre um conjunto formado pelos 4 menores percursos entre os nós de origem e destino previamente determinados. O RCA é dividido em duas partes, sendo que a primeira etapa consiste em determinar as possíveis rotas verificando os limites impostos pela PMD. A segunda etapa é atribuição de um canal virtual VOCP/VWP para acomodar a solicitação. Se nenhuma rota puder acomodar a solicitação, então a solicitação é bloqueada. Nas simulações utilizou-se a técnica dos Algoritmos Genéticos (*Genetic Algorithm*, GA) na resolução do problema de RCA em conjunto com o grupo de pesquisa da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo [5.41]. Uma descrição completa sobre a técnica empregada pode ser encontrada em [5.43]. Esta escolha ocorreu em função do alto desempenho apresentado por este tipo de algoritmo em problemas de otimização pois os GAs necessitam de pouca complexidade na sua implementação. Assim, basicamente, realiza-se um mapeamento entre fontes e espaços de cromossomos, um conjunto de operadores e uma função de resolução. As soluções ótima e sub-ótima são obtidas entre resultados que são descendentes dos elementos mais aptos das gerações prévias que evoluíram de forma que os atributos dos indivíduos mais fortes tende a ser repassado para as demais gerações [5.42].

No modelo empregado, um gene representa o estado de uma *codeword* na forma binária e um conjunto de genes forma um cromossomo. Este cromossomo representa o estado do comprimento de onda de um enlace em um determinado nó. Assim, o conjunto de todos os comprimentos de onda compõe um indivíduo que representa uma política de

atribuição. Desta forma, em um sistema com E enlaces unidirecionais e W comprimentos de onda com C códigos OOC, cada indivíduo será denotado por um vetor com dimensão $D_g = E \times W \times C$, como mostra a Tabela 5.2.

Tabela 5.2. Representação da política do sistema.

			<i>enlace</i> ₁				<i>enlace</i> _E					
W_1		W_λ		W_1		W_λ						
g_{111}	...	g_{11C}	$g_{1\lambda 1}$...	$G_{1\lambda C}$...	g_{E11}	...	g_{E1C}	$g_{E\lambda 1}$...	$g_{E\lambda C}$

sendo $g_{ikj} = \begin{cases} 1 & , \text{ se a codeword } j \text{ está em uso no } \lambda k \text{ do enlace } i \\ 0 & , \text{ caso contrário.} \end{cases}$

O algoritmo genético estabelece uma política num grupo com um conjunto de estados de todos os caminhos ópticos virtuais, o qual realiza a otimização do processamento do sistema. O algoritmo GA empregado utiliza os operadores genéticos padronizados como seleção, cruzamento e mutação, juntamente com um mecanismo de inserção de imigrantes aleatórios [5.41]. Esta inserção representa a inclusão de novos indivíduos na população já existente. Para todos os casos investigados foi utilizada uma população composta por 25 indivíduos e 50 gerações. Foi adotada uma política elitista para a seleção dos pais, de tal forma que os melhores indivíduos da população são selecionados com taxa de 20 %, aos quais foi aplicado o operador cruzamento, gerando 40 % de novos descendentes. O operador mutação foi aplicado em 20 % da população e a inserção de imigrantes foi na proporção de 20 %. A função de ajuste estima o ambiente adequado para cada indivíduo considerando o objetivo da otimização [5.42]. O seu procedimento de cálculo considera diferentes variáveis envolvidas no RCA com o objetivo de obter o maior número de caminhos ópticos virtuais considerando o estado do sistema. Para o sistema investigado a função de ajuste é calculada por meio de:

$$fit_{tot} = \sum_{i=1}^E \sum_{k=1}^{\lambda} fit(i, k, j) \quad (5.4)$$

sendo que a função de custo na trajetória i é calculada utilizando a seguinte função:

$$fit(i, k) = n_1(k)r_1 + n_2(k)r_2 + n_3(k)r_3 + n_4(k)r_4 + n_5(k)r_5 \quad (5.5)$$

sendo $n_1(k)$ o número de códigos disponíveis no comprimento de onda k no enlace i ; $n_2(k)$ é o número de enlaces na trajetória i que estão sendo utilizadas no comprimento de onda k ; $n_3(k)$ é o número de enlaces da trajetória i que não suporta as requisições de j códigos; $n_4(k)$ é o comprimento da trajetória; $n_5(k)$ é o número de nós da trajetória i , r_1 , r_2 , r_3 , r_4 e r_5 são os pesos dos coeficientes. A função custo realiza a estimativa do custo de j códigos em um comprimento de onda k para cada trajetória i , assim (5.5) representa o custo associado para determinar os j códigos no comprimento de onda k que satisfazem a requisição da trajetória i . Os coeficientes citados anteriormente foram ajustados, por meio de várias simulações, com os seguintes valores $r_1 = +5$, $r_2 = -1$, $r_3 = -2$, $r_4 = -3$, $r_5 = -5$. O desempenho do algoritmo para uma determinada demanda pode ser determinado por meio da medida da probabilidade de bloqueio, P_b , que é dada por:

$$P_b = \frac{\text{número de chamadas bloqueadas}}{\text{número de novas chamadas requisitadas}} \quad (5.6)$$

5.3.2 Resultados

O objetivo desta análise é mostrar as limitações impostas no desempenho de uma rede híbrida WDM/OCDM quando se consideram os efeitos da PMD empregando a formulação desenvolvida em 5.2.2 e a metodologia apresentada em 5.3.1. A rede escolhida para a análise é a rede de alta velocidade que cobre a região sul da Finlândia, sua topologia consiste de 12 nós e 19 enlaces bidirecionais como mostra a Fig. 5.2. Esta rede foi escolhida por apresentar enlaces com distâncias variadas e se aproximar de uma rede com características geográficas para atender cidades de grande porte ou várias cidades próximas, assim para este tipo de rede seria indicada a aplicação da tecnologia WDM/OCDM. Por outro lado, esta topologia de rede já foi empregada na análise de desempenho de redes WDM/OCDM [5.12]. Serão considerados enlaces com 8 comprimentos de onda com uma taxa transmissão de 1,0, 2,5 e 10,0 Gbps cada.

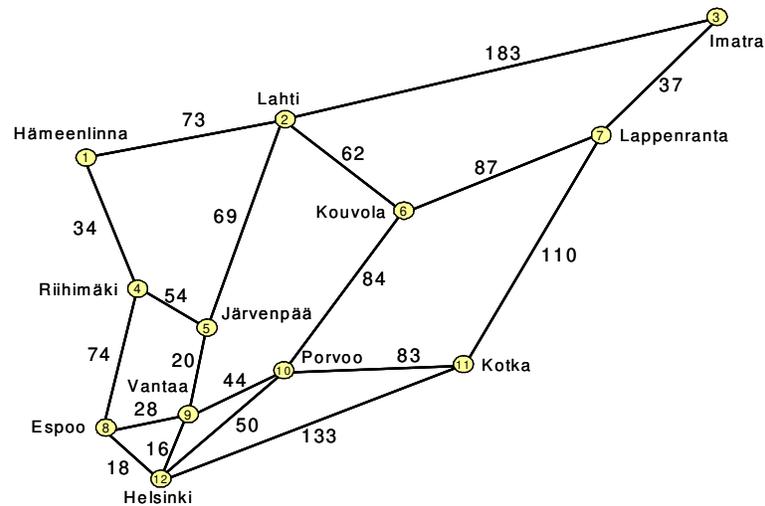


Fig. 5.2. Rede óptica de alta velocidade do sul da Finlândia.

A análise de resultados tem início com estudo dos efeitos da PMD sobre o desempenho da rede considerando diferentes taxas de transmissão. As taxas de transmissão consideradas neste estudo consistem de 1,0, 2,5 e 10,0 Gbps. Para esta análise consideram-se diferentes valores de tráfego por nó e coeficiente de PMD de $0,1 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$. A Fig. 5.3 ilustra esta análise por meio da probabilidade de bloqueio em função do número de códigos OOC. Foram considerados códigos ópticos com peso 4.

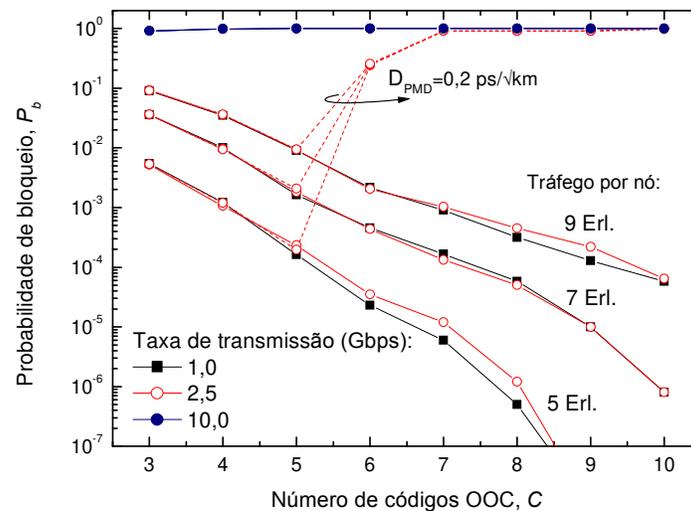


Fig. 5.3. Probabilidade de bloqueio em função do número de códigos OOC.

A Fig. 5.3 ilustra que o aumento do número de códigos ópticos OOC gera uma diminuição na probabilidade de bloqueio, este comportamento ocorre em função do aumento do número de canais disponíveis para escoar a demanda de tráfego na rede. Porém, o aumento do número de códigos OOC produz um aumento do comprimento dos códigos em função da cardinalidade dos códigos ópticos, este aumento do comprimento dos códigos varia diretamente com a taxa de transmissão empregada na rede, pois a taxa efetivamente transmitida é a taxa de transmissão multiplicada pelo comprimento do código. O aumento da taxa limita o comprimento máximo do enlace em função dos efeitos da PMD, assim os enlaces que tiverem seu comprimento limitado pela PMD terão um comprimento menor que a distância real do enlace e serão bloqueados. Para as taxas de transmissão de 1,0 e 2,5 Gbps a PMD não irá influenciar no desempenho da rede considerando um coeficiente de PMD de $0,1 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$. Porém para a taxa de transmissão de 10 Gbps o bloqueio será total. Observe também nesta figura que o aumento do coeficiente de PMD tem um forte impacto no desempenho da rede, assim para a taxa de transmissão de 2,5 Gbps com um coeficiente de PMD de $0,1 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$ não havia restrições impostas pela PMD, entretanto considerando um coeficiente de PMD de $0,2 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$ verifica-se que o número de códigos OOC por comprimento de onda fica limitado a 5 códigos. Para melhor ilustrar os efeitos do coeficiente de PMD no desempenho da rede ilustra-se na Fig. 5.4 a probabilidade de bloqueio em função do número de códigos OOC considerando os coeficientes de PMD com valores de 0,1, 0,2 e 0,3 $\text{ps}/\sqrt{\text{km}}$. Neste gráfico as linhas contínuas e tracejadas representam códigos ópticos com peso igual a 3 e 4, respectivamente. A taxa de transmissão considerada foi 1,0 Gbps.

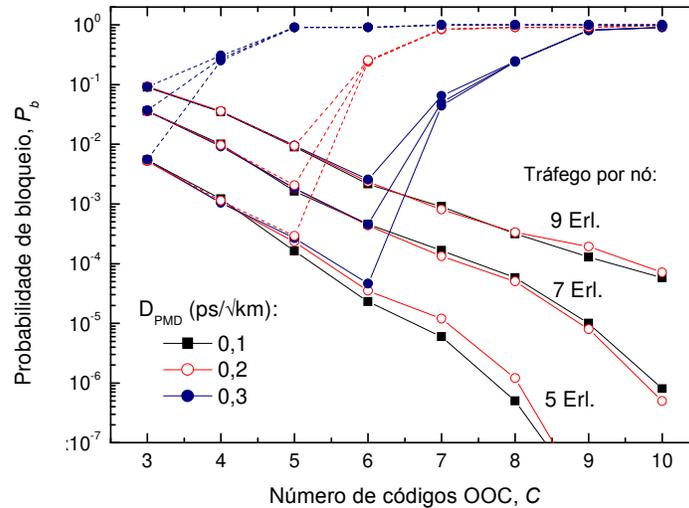


Fig. 5.4. Probabilidade de bloqueio em função do número de códigos OOC.

A Fig. 5.4 mostra, como foi ilustrado no caso anterior, que o aumento do coeficiente de PMD causa um aumento na probabilidade de bloqueio. No caso extremo, verifica-se que para um valor de coeficiente de PMD de $0,3 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$ os efeitos da PMD limitam o número de códigos ópticos a 3 e a 6 para códigos com peso igual a 3 e 4, respectivamente. Por meio destes resultados confirma-se o fato do aumento do peso do código aumentar os efeitos da PMD. Neste ponto é preciso efetuar uma análise criteriosa para definir os parâmetros dos códigos ópticos empregados, pois o aumento do peso do código está diretamente relacionado a uma baixa BER, por outro lado quando se realiza QoS na camada física atribuí-se os maiores pesos aos códigos ópticos que transportam informações com maior requisito de QoS [5.43].

A Fig. 5.5 ilustra a probabilidade de bloqueio em função do número de códigos OOC considerando o peso dos códigos ópticos como 3, 4 e 5. Neste gráfico as linhas contínuas e tracejadas representam coeficientes de PMD igual a $0,1$ e $0,2 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$, respectivamente. A taxa de transmissão considerada foi $1,0 \text{ Gbps}$.

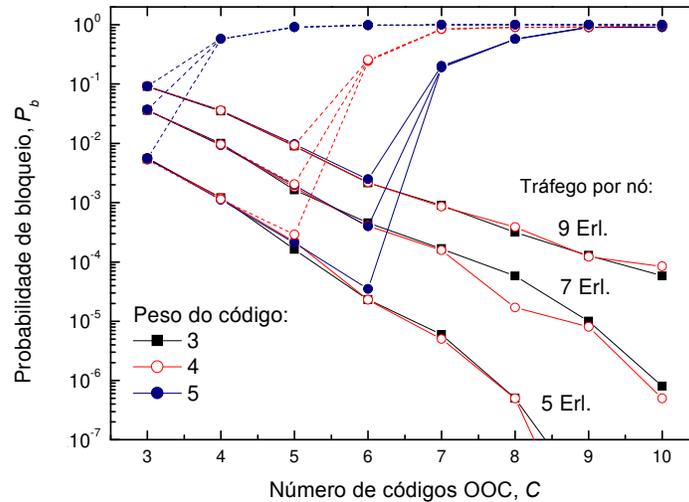


Fig. 5.5. Probabilidade de bloqueio em função do número de códigos OOC.

Por meio da Fig. 5.5 verifica-se que os efeitos da PMD apresentam um impacto no desempenho da rede quando se aumenta o peso dos códigos ópticos e este aumento é maior quando também se aumenta o coeficiente de PMD. Observe na Fig. 5.5 que o número máximo de códigos OOC permitidos para códigos com peso igual a 5 é 3 e 6 para um valor de coeficiente de PMD de 0,1 e 0,2 ps/ $\sqrt{\text{km}}$, respectivamente.

5.4 Efeitos da PMD em Rotas Ópticas WDM/OCDM

Conforme foi discutido na seção anterior o aumento da taxa de transmissão, peso do código e coeficiente de PMD implicam no aumento da taxa de bloqueio na rede em função da limitação do comprimento dos enlaces permitidos. Uma alternativa para diminuir os efeitos da PMD seria o emprego de códigos OOC com peso menor, porém o peso do código afeta diretamente a MAI e pode aumentar a BER. Neste contexto, o estudo dos efeitos da PMD e da MAI considerando os parâmetros como peso e número de códigos ópticos em um mesmo comprimento de onda consistem de um elemento fundamental para determinar o desempenho do enlace. Neste contexto, nesta seção será realizado um estudo considerando os efeitos da MAI e da PMD em rotas ópticas WDM/OCDM que empregam códigos OOC na configuração SIK.

5.4.1 Metodologia de Análise

A análise dos efeitos da MAI e PMD sobre rotas ópticas baseadas em códigos ópticos OOC na configuração SIK é realizada de forma analítica com o intuito de determinar PER em um determinado comprimento de onda que possui C caminhos ópticos baseados em códigos OOC. A PER é dada por:

$$PER = \sum_{i=1}^C p(i)P_p(i) \quad (5.7)$$

sendo que $p(i)$ representa a probabilidade que i pacotes transportados por C canais ópticos OOC estão se sobrepondo. Considerando que a utilização do enlace, $\hat{\rho}$, é a mesma para todos os canais ópticos, se verifica que esta probabilidade obedece a uma distribuição binomial dada por [5.46]:

$$p(i) = \binom{C}{i} \hat{\rho}^i (1 - \hat{\rho})^{C-i} \quad (5.8)$$

Com o intuito de calcular o pior caso será considerado que todos os pacotes em C canais ópticos OOC estão sincronizados. Em função dos elementos apresentados a PER em cada canal óptico OOC é dado por:

$$P_p = 1 - (1 - BER)^{packet} \quad (5.9)$$

sendo $packet$ o comprimento dos pacotes e BER é a taxa média de erro de bit em cada canal OOC. Desta forma, a PER pode ser escrita como:

$$PER = \sum_{i=1}^C \binom{C}{i} \hat{\rho}^i (1 - \hat{\rho})^{C-i} \left[1 - (1 - BER)^{packet} \right] \quad (5.10)$$

As contribuições para a BER em cada canal OOC consistem dos efeitos da MAI e da PMD. A contribuição da MAI na BER para canais ópticos OOC na configuração SIK são obtidos por meio de (2.8), conforme é reescrito abaixo:

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{SNR_{OOC-SIK}}{2}} \right) \quad (5.11)$$

$$SNR_{OOC-SIK} = \frac{(\mathfrak{R}P_R)^2}{\frac{2(C-1)}{3L} (\mathfrak{R}P_R)^2 + 16B_e \left(\frac{e\mathfrak{R}CP_R}{4} + N_{th} \right)} \quad (5.12)$$

Por outro lado, os efeitos da PMD sobre a BER são obtidos considerando a seguinte condição. O enlace que apresenta comprimento superior ao comprimento do enlace limitado pela PMD apresentará aumento da BER , desta forma pode-se considerar que o limite superior é que a BER será máxima ($BER = 0,5$) para o caso de enlaces que apresentem comprimento superior ao comprimento limitado pela PMD (L_{MAX}) que pode ser reescrito a partir de (5.3) para um único comprimento de onda.

$$L_{Max} = \frac{1}{D_{PMD}^2} \left(\frac{a}{B \cdot [C \cdot w \cdot (w-1) + 1]} \right)^2 \quad (5.13)$$

Por outro lado, para os enlaces com comprimento inferior ao comprimento máximo apresentará somente os efeitos da MAI sobre a BER . Em função das considerações apresentadas a BER em um canal óptico OOC é dada por

$$BER = \begin{cases} \text{Se } L_0 \geq L_{MAX} & BER = 0,5 \\ \text{Se } L_0 < L_{MAX} & BER = BER \end{cases} \quad (5.14)$$

5.4.2 Resultados

Nos resultados obtidos foi considerado $\mathfrak{R} = 0,85$, $P_R = -10$ dBm, $Be = B/2$, e $N_{th} = 1\text{pA}^2\text{Hz}^{-1}$ e que $\rho = 1$, ou seja, que existe um fluxo contínuo de dados em cada canal óptico OOC. O comprimento dos códigos OOC é obtido de forma iterativa a partir de (5.2). A Fig. 5.6 ilustra a *PER* em função do número de códigos OOC em um comprimento de onda considerando a taxa de transmissão de 1,0 Gbps, PMD igual a $0,1 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$ e o comprimento dos pacotes igual a 1500 bytes. As linhas pontilhadas ilustram somente os efeitos da MAI sobre a *PER*. Para obtenção deste resultado foram considerados enlaces com comprimento máximo permitido igual a 30 e 60 km. A *PER* em função do número de códigos OOC, ilustrada nas Fig. 5.6, 5.7, 5.8, 5.9 e 5.10, é obtida por meio de (5.10) sendo a *BER* calculada empregando (5.14). No caso dos efeitos da MAI utiliza-se (5.11) e (5.12) para a obtenção da *BER*.

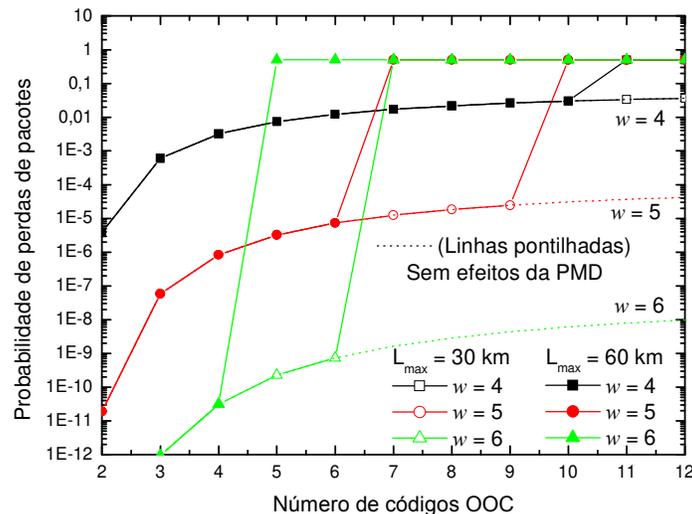


Fig. 5.6. *PER* em função do número de códigos OOC.

Por meio da Fig. 5.6 se verifica que a *PER* aumenta em função do aumento do número de códigos OOC. Outro comportamento observado é que os efeitos da MAI é fortemente influenciado pelo peso do código, já com relação aos efeitos da PMD o desempenho será degradado quando o produto $(L \cdot L_{MAX} \cdot B)$ é alcançado. Portanto, deve ser considerado o compromisso entre reduzir os efeitos da PMD com o menor produto

($L.L_{MAX}.B$) possível e evitar os efeitos da MAI com códigos OOC com peso elevado. O peso do código influencia no comprimento do código conforme ilustra (5.2). Por exemplo, para obter uma PER de 1×10^{-8} com códigos com peso 5 é possível utilizar no máximo 2 códigos OOC para enlaces com comprimento máximo tanto de 30 como 60 km em função da limitação da MAI. Por outro lado, para códigos com peso 6 é possível utilizar 4 códigos OOC para enlaces com comprimento máximo de 60 km e utilizar 6 códigos OOC para enlaces com comprimento máximo de 30 km. Nestes dois casos a limitação ocorre em função dos efeitos da PMD.

Com o intuito de analisar os efeitos da PMD em função do aumento da taxa de transmissão se ilustra na Fig. 5.7 a PER em função do número de códigos OOC em um comprimento de onda considerando os mesmos parâmetros empregados na obtenção da Fig. 5.6, porém com a taxa de transmissão igual a 2,5 Gbps.

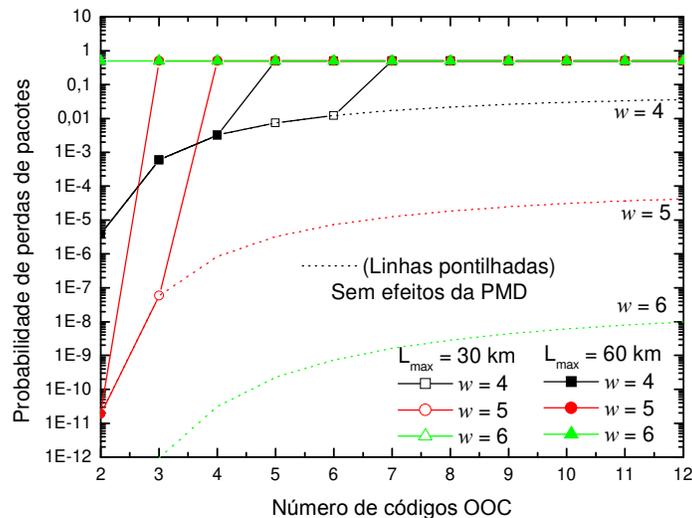


Fig. 5.7. PER em função do número de códigos OOC.

A principal diferença entre a Fig. 5.6 e Fig. 5.7 é impossibilidade de utilizar códigos com peso 6. Apesar deste peso de código garantir uma baixa PER em função dos efeitos da MAI, os efeitos da PMD afetam fortemente a PER em função do aumento da taxa de transmissão. Uma forma de diminuir o impacto da PMD é a utilização de fibras com baixos valores de PMD variando de 0,05 a 0,1 ps/\sqrt{km} [5.15]. Nas Fig. 5.8 e 5.9 é ilustrada a PER em função do número de códigos OOC em um comprimento de onda considerando o peso

do código igual a 5, taxa de transmissão igual a 1 e 2,5 Gbps, PMD igual a 0,05 and $0,1 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$ e L_{MAX} igual a 30 na Fig. 5.8 e 60 km na Fig. 5.9.

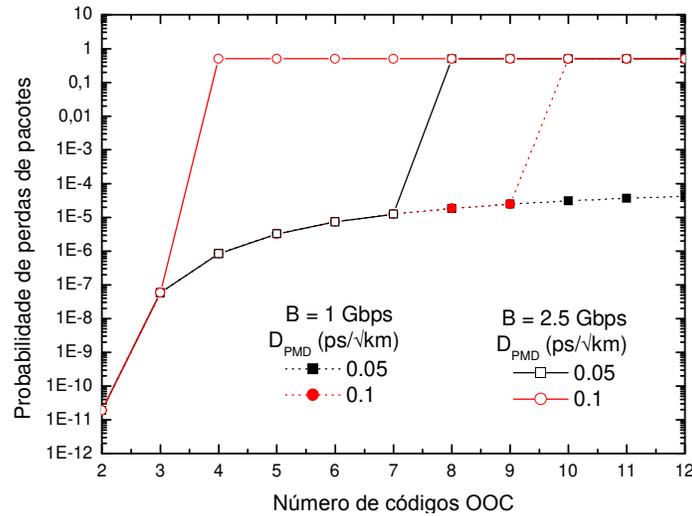


Fig. 5.8. *PER* em função do número de códigos OOC, $L_{Max} = 30$ km.

Observe na Fig. 5.8 o impacto do coeficiente de PMD sobre a *PER*. Por exemplo, considerando a taxa de transmissão de 2,5 Gbps os efeitos da PMD começarão afetar fortemente a *PER* a partir de 3 e 6 códigos OOC para coeficientes de PMD de 0,1 and 0,05 $\text{ps}/\sqrt{\text{km}}$, respectivamente. Nestes casos, o efeito dominante para um número menor de códigos é a MAI. Por outro lado, para a taxa de transmissão de 1,0 Gbps os efeitos da PMD afetarão a *PER* a partir da utilização de 9 códigos OOC para o coeficiente de PMD igual a 0,1 $\text{ps}/\sqrt{\text{km}}$, já para o coeficiente de PMD igual a 0,05 $\text{ps}/\sqrt{\text{km}}$ a PMD não afetará a *PER* e o efeito predominate será a MAI.

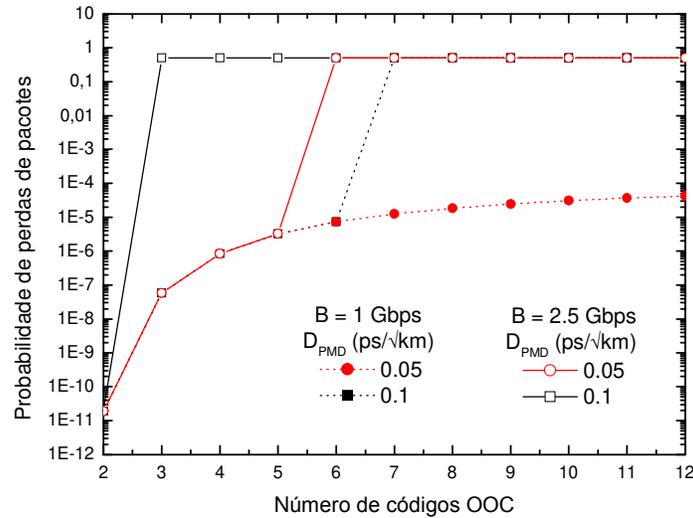


Fig. 5.9. *PER* em função do número de códigos OOC, $L_{Max}=60$ km.

Observe na Fig. 5.9 que ocorre uma redução do número de códigos OOC utilizados em função dos efeitos da PMD em comparação com a Fig. 5.8. Este efeito é explicado em função do aumento do comprimento máximo do enlace de 30 km para 60 km, desta forma o produto ($L \cdot L_{MAX} \cdot B$) é alcançado com um número menor de códigos OOC.

Na Fig. 5.10 ilustra-se a *PER* em função do número de códigos OOC em um comprimento de onda considerando o coeficiente de PMD igual a $0.1 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$, taxa de transmissão 1 Gbps e $L_{Max} = 30$ km. Para pacotes de comprimento iguais a 50, 500 e 1500 bytes.

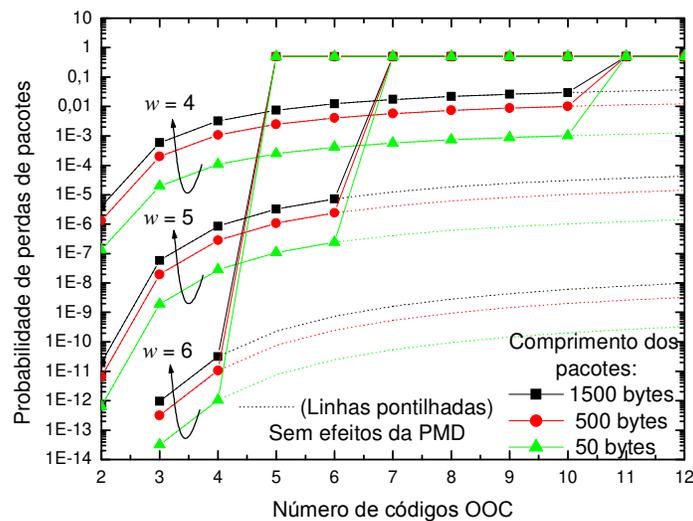


Fig. 5.10. *PER* em função do número de códigos OOC.

Por meio da Fig. 5.10 se verifica que pacotes com maior comprimento apresentam maior *PER*. Este efeito ocorre em função da maior probabilidade que estes pacotes apresentam de sobreposição com outros pacotes transportados em códigos OOC distintos. Por outro lado, o comprimento dos pacotes influencia fortemente os efeitos da MAI, porém não apresenta influencia quando os efeitos da PMD se tornam predominantes. Por exemplo, considerando códigos OOC com peso igual a 5 o número máximo de códigos OOC permitidos com uma *PER* de 1×10^{-8} é aproximadamente 2, 3 e 4 to para pacotes com comprimento de 1500, 500 e 50 bytes, respectivamente.

5.5 Sumário

Neste capítulo foi realizada uma análise dos efeitos da PMD sobre redes híbridas que empregam a tecnologia OCDM em conjunto com a tecnologia WDM. Verificou-se que a PMD apresenta características mais complexas que a dispersão cromática, principalmente em função de sua natureza aleatória, assim as técnicas de compensação dos efeitos da PMD são mais complexas e de alto custo. Neste contexto, foi realizado um estudo dos efeitos da PMD sobre redes híbridas WDM/OCDM verificando-se a restrição da limitação dos comprimentos dos enlaces em função da PMD. Os principais resultados observados em redes WDM/OCDM mostram que o aumento da taxa de transmissão aumenta a probabilidade de bloqueio na rede, este comportamento ocorre em função do aumento do comprimento dos códigos ópticos. Assim, para a taxa de 10,0 Gbps a rede apresenta um bloqueio total, este comportamento diminui para uma taxa de 2,5 Gbps, porém ainda compromete o bloqueio da rede. Verifica-se que para uma taxa de 1,0 Gbps a rede apresenta um comportamento adequado com relação a probabilidade de bloqueio. Outro fator que aumenta o bloqueio da rede é o coeficiente de PMD, desta forma o desenvolvimento de novas fibras ópticas com menor valor de coeficiente de PMD poderá diminuir os efeitos da PMD. Finalmente, se observa que o aumento do peso dos códigos leva ao aumento do bloqueio da rede, este efeito deve ser analisado com critério, pois o aumento do peso do código está diretamente relacionado a uma baixa BER em função da MAI, assim deve haver uma otimização para que a PMD e a MAI não prejudique o desempenho da rede. Com o intuito de analisar os efeitos da MAI em conjunto com os efeitos da PMD foi realizado um estudo baseado em um formalismo analítico do impacto destes efeitos sobre caminhos ópticos formados por códigos OOC. Neste estudo se observou que o aumento do número de códigos OOC afetará o aumento da *PER* em função do aumento da MAI. Porém, também se verificou que o aumento do número de códigos OOC influenciará no aumento do produto $(L \cdot L_{MAX} \cdot B)$ que determina as limitações em função da PMD. A metodologia desenvolvida para o estudo do impacto da MAI e PMD e os resultados obtidos podem ser empregados para a determinação dos parâmetros dos códigos OOC utilizados nos enlaces ópticos WDM/OCDM.

Capítulo 6

Redes OBS com Rótulos de Códigos Ópticos

Neste capítulo é proposta uma arquitetura de rede óptica comutada por rajadas (OBS) baseada no processamento óptico de rótulos compostos por códigos OOC. O objetivo da utilização do processamento óptico é a diminuição do tempo empregado no processamento dos rótulos e por consequência, a diminuição da probabilidade de perdas de rajadas, aumento da utilização e a economia nos recursos da rede. Esta arquitetura é descrita considerando a utilização da sinalização de reserva de recursos empregando o protocolo JIT (*Just-in-Time*).

6.1 Introdução

O constante crescimento da Internet está resultando em um aumento de demanda por altas taxas de transmissão e tecnologias de comutação que apresentam elevada velocidade de chaveamento [6.1]. A tecnologia da multiplexação por divisão de comprimentos de onda WDM tem fornecido uma elevadíssima largura de banda. Porém, as tecnologias utilizadas na comutação eletrônica ainda não apresentam uma velocidade de comutação compatível [6.2]. Para tornar eficiente o uso da tecnologia WDM é preciso o emprego de tecnologias que permitam o roteamento e o encaminhamento de pacotes numa taxa de Tbps [6.3]. Uma solução seria o emprego de redes ópticas de pacotes, pois nestas redes o tráfego é

transportado em pacotes ópticos juntamente com as informações de controle transportadas no cabeçalho óptico. Este tipo de arquitetura apresenta a vantagem de possuir elevada utilização dos enlaces em função da multiplexação estatística e grande capacidade de adaptação ao tipo de tráfego oferecido à rede [6.4]. Porém, a tecnologia deste tipo de arquitetura ainda não está bem desenvolvida e o custo é extremamente elevado. Por essa razão, um dos principais desafios na área é a busca pelo acesso aleatório a memória RAM (*Random Access Memory*) no domínio óptico [6.4]. Até o presente momento, o meio mais efetivamente utilizado como forma de armazenar as informações no domínio óptico por um tempo limitado são as fibras de linha de retardo FDL [6.4]. Uma solução proposta utiliza redes comutadas por rajadas, também denominadas redes OBS [6.7]. Nestas redes o cabeçalho e as rajadas de dados são transportados em comprimentos de onda distintos. Desta forma, o cabeçalho é processado eletronicamente nos OXCs da rede para efetuar a reserva de recursos somente por um intervalo de tempo determinado [6.8]. Assim, o caminho óptico estabelecido entre os nós de ingresso da rede é desconectado após o transporte da rajada. Esta separação entre o cabeçalho e os dados fornece às redes OBS uma grande flexibilidade e facilidade de gerenciamento [6.1]. A Fig. 6.1 ilustra o esquema de uma rede OBS.

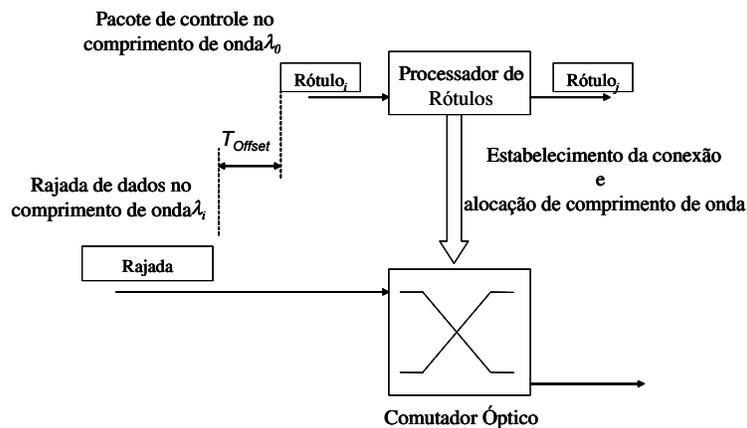


Fig. 6.1. Esquema de uma rede OBS.

A Fig. 6.1 ilustra a diferença de tempo entre o envio dos rótulos e as rajadas de dados conhecido como tempo de *offset* (T_{offset}), que pode ser calculado por meio de [6.7]:

$$T_{offset} = NT_{Setup} + T_{OXC} \quad (6.1)$$

sendo que N é o número de nós da rota óptica, T_{OXC} representa o tempo necessário para a configuração da conexão entre a entrada e a saída do comutador óptico, para estabelecer o caminho óptico desejado, e T_{Setup} representa a quantidade de tempo necessário para realizar o processo de reserva dos recursos da rede e está relacionado com o tempo de processamento eletrônico e a propagação da luz ao longo das fibras ópticas.

Neste trabalho será empregado o termo rótulo para definir os pacotes de controle ou rótulos de redes OBS em virtude da possibilidade da utilização do GMPLS para roteamento e sinalização para o estabelecimento dos caminhos ópticos [6.1][6.9]. Apesar das vantagens apresentadas pelas redes OBS, estudos recentes indicam que o atraso ocorrido em função do processamento eletrônico dos rótulos pode tornar-se crítico em redes que trabalham com altas taxas de transmissão [6.10]. Este atraso se torna mais crítico para transmissão de rajadas de pequeno comprimento, pois neste caso a utilização da rede pode diminuir e também os requisitos de QoS não serão atendidos. No intuito de superar estas limitações estão sendo propostos recursos como *grooming* [6.11], roteamento por deflexão [6.12] e várias técnicas de montagem das rajadas [6.13]. Uma alternativa é o emprego do processamento óptico dos rótulos ópticos nas redes OBS como uma forma de aumentar a velocidade de processamento e a taxa de utilização destas redes. Este tipo de processamento foi inicialmente proposto em [6.14] e consistiu da utilização de pacotes de controle baseados em códigos ópticos coerentes da tecnologia de multiplexação por divisão de código OCDM [6.15]. Os códigos ópticos coerentes empregam a modulação de fase e intensidade e são mais complexos para implementar que os códigos ópticos não-coerentes, que utilizam somente a modulação em intensidade, como já foi ilustrado [6.16]. Neste contexto, o objetivo deste capítulo é propor e analisar uma arquitetura de redes ópticas OBS com rótulos de códigos ópticos não-coerentes, como os códigos ópticos ortogonais (OOC) [6.17].

O restante deste capítulo está organizado da seguinte forma. Na Seção 6.2 ilustra-se a arquitetura da rede proposta. Na Seção 6.3 é apresentada a metodologia de análise de desempenho. Na Seção 6.4 apresentam-se os principais resultados e finalmente, na Seção 6.5 discutem-se as principais conclusões obtidas neste trabalho.

6.2 Arquitetura da Rede

A arquitetura de rede OBS proposta neste trabalho emprega rótulos de códigos OOC que são transmitidos no comprimento de onda destinado para controle. As informações transmitidas nos demais comprimentos de onda não empregam multiplexação OCDM. A seguir são ilustradas as principais características das redes OBS com processamento eletrônico.

6.2.1 Redes Comutadas por Rajadas (OBS)

Neste tipo de rede os dados são coletados nos nós de borda da rede e agrupados em rajadas de acordo com características como destino, classe de serviço CoS e QoS dependendo da arquitetura da rede [6.11]. Estes nós OBS são responsáveis por estabelecer os mecanismos de conexão que consistem em sinalização, roteamento e alocação de comprimento de onda [6.8]. A Fig. 6.2 ilustra um modelo simplificado de um roteador de borda que apresenta o princípio de funcionamento similar ao roteador de borda descrito na Seção 3.2 .

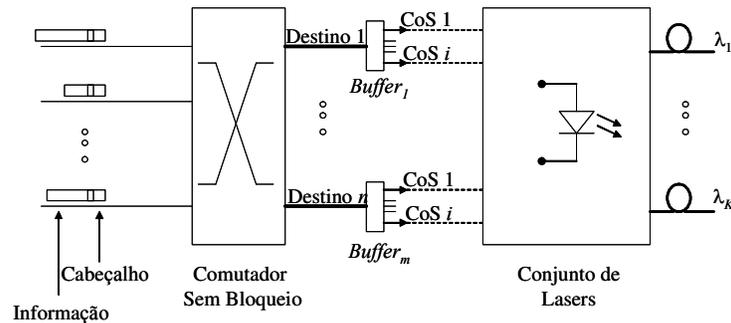


Fig. 6.2. Modelo de roteador de borda utilizado em redes OBS.

A sinalização é utilizada para estabelecer e desconectar as *lighpaths* reservadas, o roteamento é empregado para definir a trajetória que a rajada terá ao longo da rede e a alocação de comprimento de onda determina o comprimento de onda que será utilizado para a transmissão da rajada. A sinalização específica qual o tipo de protocolo será utilizado entre os nós da borda da rede para solicitarem acesso aos nós do núcleo da rede.

Até o presente momento, os protocolos de sinalização podem ser classificados em duas categorias conhecidas como sinalização distribuída, com reserva em sentido único, e sinalização centralizada com reserva fim-a-fim [6.1]. Na sinalização distribuída com reserva em sentido único existe a transmissão do rótulo pelo nó OBS de ingresso na rede, antes da transmissão da informação. O rótulo possui informações sobre a rajada e é processado eletronicamente no nó de ingresso e nos demais nós da rede. Este esquema facilita o controle eletrônico eficiente e permite que as informações transmitidas permaneçam inteiramente no domínio óptico. Dentre os protocolos que se enquadram nesta categoria pode-se citar o TAG (*Tell-and-Go*), JIT e o JET (*Just-Enough-Time*) [6.6][6.7]. Na sinalização tipo TAG ocorre a transmissão do rótulo pelo nó OBS de ingresso na rede antes da transmissão da informação para a reserva de recursos para a rajada com intervalo de tempo praticamente nulo [6.7]. O rótulo reserva recursos como comprimento de onda e FDL em cada nó da rota, pois enquanto o rótulo é processado eletronicamente a rajada fica armazenada. Após completar a transmissão da rajada o nó de ingresso envia outro pacote de controle para a liberação dos recursos da rede. Na sinalização tipo JET existe a transmissão do rótulo pelo nó OBS de ingresso na rede antes da transmissão da informação para a reserva de recursos para a rajada [6.8]. O intervalo de tempo entre a transmissão do pacote de controle e da informação é denominada de T_{Offset} . A Fig. 6.3 (a) ilustra este processo de reserva de recursos da rede em função do tempo. O rótulo possui informações sobre a rajada como duração, destino, prioridade e é processado no nó de ingresso e nos demais nós da rede.

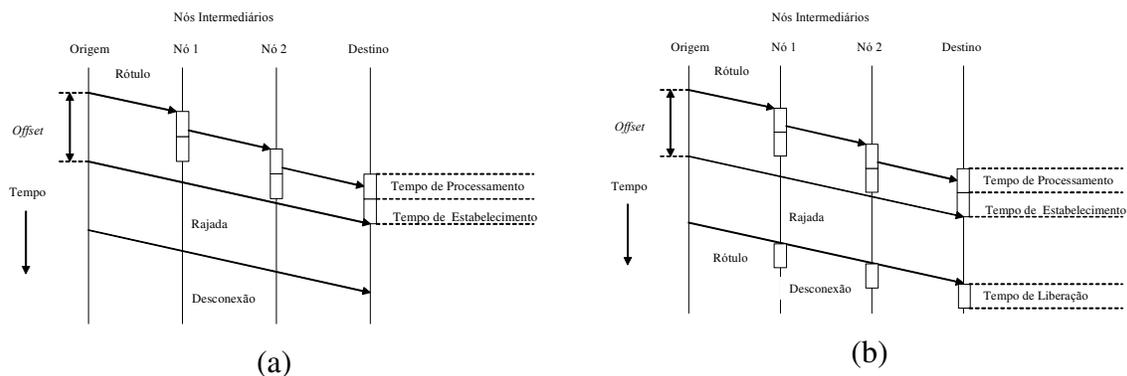


Fig. 6.3. Processo de reserva de recursos em função do tempo com processamento eletrônico dos rótulos. Empregando o protocolo de sinalização (a) JET e (b) JIT.

Na sinalização tipo JET ocorre a liberação dos recursos após o tempo previsto de utilização pela rajada. Este tipo de sinalização apresenta um efeito positivo na diminuição da probabilidade de perdas de rajadas [6.10]. Porém, apresenta a complexidade de necessitar do controle exato de todos os tempos envolvidos no processo. Assim esta sinalização pode apresentar dificuldade de implementação em redes legadas [6.18]. Uma alternativa é a sinalização tipo JIT. Nesta sinalização também existe a transmissão do rótulo num intervalo de tempo antes da transmissão da rajada como na sinalização tipo JET, entretanto após a transmissão da rajada é enviado um rótulo para efetuar a liberação dos recursos como ilustra a Fig. 6.3 (b). Desta forma, a sinalização tipo JIT aumenta a quantidade de rótulos na rede, porém requer menos complexidade com relação à predição dos tempos envolvidos no processo de sinalização [6.18].

6.2.2 Redes Comutadas por Rajadas (OBS) com Processamento Óptico

A utilização do processamento óptico foi inicialmente proposta em [6.14]. Neste trabalho foi ilustrada a necessidade de desenvolver o processamento óptico em consequência da baixa utilização das redes OBS quando rajadas de pequena duração, com aproximadamente 1 kbyte, são transmitidas em enlaces com elevada taxa de transmissão. Também, foi apresentada uma possível arquitetura para o processamento óptico dos rótulos empregando códigos ópticos coerentes para a sinalização tipo JET. O desempenho desta arquitetura em conjunto com um esquema de sinalização denominado *Optical Code-TaG* foi analisado, por meio de simulações em [6.25]. O esquema de sinalização *Optical Code-TaG* emprega os códigos ópticos para realizar o processo de reserva e também a liberação de recursos. Os resultados obtidos foram promissores, ocorrendo uma diminuição de 60% na probabilidade de bloqueio global e um ganho de utilização de 2,5. O ganho de utilização é definido pela razão entre a probabilidade de bloqueio obtida com o processamento eletrônico e a probabilidade de bloqueio obtida com o processamento óptico. Os bons resultados obtidos têm aumentado a perspectiva da implementação de redes OBS com processamento óptico para testes [6.26][6.27].

Neste contexto, verifica-se que o desenvolvimento da tecnologia de processamento óptico de rótulos em redes OBS está em fase inicial de pesquisa, com ênfase em códigos coerentes, limitado a praticamente a um grupo de pesquisa. Portanto, é interessante investigar o potencial desta aplicação utilizando códigos ópticos com implementação mais simples. Assim, será analisada neste trabalho a utilização de códigos ópticos OOC para o processamento óptico em redes OBS. O processamento óptico de rótulos possui como principal objetivo a diminuição do tempo de processamento óptico nos OXCs do núcleo da rede. A Fig. 6.4 ilustra o menor tempo de processamento e a diminuição do tempo de T_{Offset} entre a rajada e o rótulo.

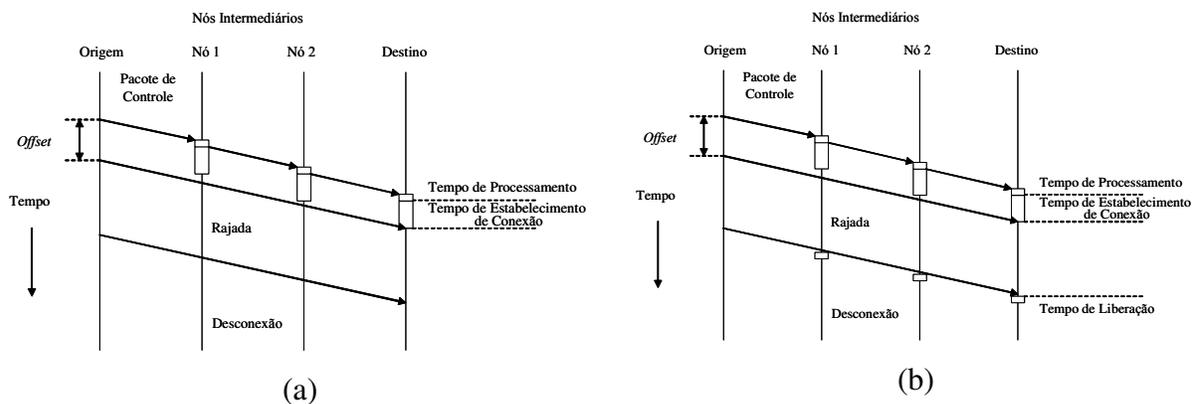


Fig. 6.4. Processo de reserva de recursos em função do tempo com processamento óptico dos rótulos. Empregando o protocolo de sinalização (a) JET e (b) JIT.

Neste trabalho será considerada a sinalização tipo JIT em função da exatidão dos resultados obtidos de forma analítica [6.33]. A seguir será descrito o funcionamento do processador óptico empregado nesta sinalização. O processador óptico de rótulos OOC é ilustrado na Fig. 6.5. Neste processador óptico ocorre a divisão de potência do rótulo OOC que chega ao processador. Esta divisão fornece três cópias do rótulo, sendo utilizada para atribuição dos comprimentos de onda, outra empregada na determinação da rota estabelecida e a última cópia é utilizada na troca de rótulos. Na atribuição de comprimentos de onda e roteamento ocorre a correlação óptica dos rótulos. Neste processo será extraído o sinal que apresentar a maior correlação com o decodificador e a potência do código será convertida em sinal elétrico por meio de conversão EO gerando sinais de controle que realizam a reserva dos recursos da rede, ou seja, reservam a posição de comutação e o

enlace WDM solicitados pelo roteamento da rede até a chegada do rótulo com a mensagem de liberação dos recursos. A troca de rótulos é realizada no domínio óptico por meio dos OXCs que foram ilustrados no Capítulo 4.

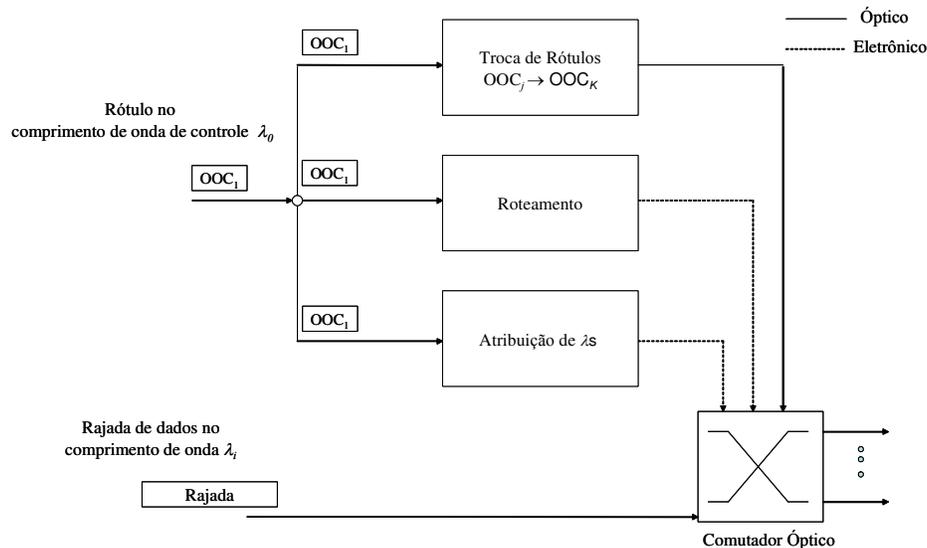


Fig. 6.5. Arquitetura interna de leitura, troca de rótulos e comutação.

No emprego do protocolo JIT os recursos ficam reservados até que o rótulo com as informações de liberação de recursos seja processado. Portanto, é preciso distinguir os rótulos de conexão e desconexão. Esta distinção pode ser realizada utilizando códigos OOC com famílias de códigos distintos.

6.3 Metodologia de Análise

No desenvolvimento das redes OBS têm sido investigadas intensamente técnicas de análise de desempenho com o objetivo de empregá-las no dimensionamento da estrutura física e desenvolver métodos de gerenciamento da rede. A modelagem matemática das redes OBS pode ser realizado por meio de métodos analíticos e numéricos [6.6][6.13] [6.28]. Neste trabalho a modelagem da rede OBS será realizada de forma analítica com o objetivo de ilustrar os efeitos da utilização do processamento óptico no dimensionamento e também no desempenho das redes OBS. Inicialmente, serão determinadas as formulações

para o cálculo do tempo de processamento óptico quando se empregam códigos OOC. Em [6.31] foi ilustrado que o tempo necessário para a correlação óptica de códigos ópticos é dado por:

$$T_p = \frac{1}{(L-1)/T_c} \quad (6.2)$$

sendo L o comprimento do código óptico e T_c o período de *chip* que é dado por $1/(BL)$, sendo B a taxa de transmissão e C o número de códigos numa família de códigos com mesmo peso (w) resultando em:

$$T_c = \frac{1}{B[C \cdot w \cdot (w-1) + 1]} \quad (6.3)$$

A partir do tempo de processamento óptico é possível investigar o desempenho da rede OBS por meio do parâmetro denominado utilização da rede (U), que é a razão entre o tempo médio de duração das rajadas e o tempo de processamento. A utilização da rede é definida por [6.26] como:

$$U(\%) = \frac{t_{rajada}}{t_{rajada} + T_p} \times 100 \quad (6.4)$$

t_{rajada} representa a duração da rajada transmitida. A utilização da rede também representa uma medida de *throughput* da rede e é válida para a situação na qual a probabilidade de perdas de rajadas na rede é zero [6.27].

Como foi ilustrada anteriormente, uma grande parte do tráfego que é lançado nas redes é composto por pacotes com pequeno tamanho. Neste capítulo será ilustrado que uma das vantagens da utilização do processamento óptico é a possibilidade da rede OBS transmitir rajadas com pequena duração. A seguir será ilustrada a metodologia para analisar o efeito do comprimento das rajadas no desempenho da rede OBS. Considerando uma rede OBS saturada, a taxa média de chegada das rajadas num comutador óptico (λ_{OXC}) é dada por [6.34]:

$$\lambda_{OXC} = F(W - k_c)\lambda \quad (6.5)$$

sendo que F é o número de fibras, W é o número de comprimentos de onda por fibra, k_c é o número de comprimentos de onda de controle e λ é a taxa média de chegada das rajadas num determinado comprimento de onda. Neste caso, a taxa de chegada das rajadas será igual a taxa de chegada dos rótulos que é $1/T_P$, onde T_P é o tempo de processamento dos rótulos. Para obter a estabilidade da rede é preciso que:

$$T_P < \frac{1}{F(W - k_c)\lambda} \quad (6.6)$$

Portanto, a taxa média de chegada das rajadas por comprimento de onda deve ser limitada em:

$$\lambda < \frac{1}{F(W - k_c)T_P} \quad (6.7)$$

Considerando o pior caso, no qual os comprimentos de onda estão sendo completamente utilizados, ou seja, $\rho = \lambda/\mu = 1$, sendo ρ a utilização do enlace, as rajadas devem ter uma duração mínima dada por:

$$T_{Rajada}^{\min} = \frac{1}{\mu} = F(W - k_c)T_P \quad (6.8)$$

Agora será analisado o esquema de reserva de comprimentos de onda empregando a sinalização JIT. Neste esquema devem-se considerar dois pontos importantes. O primeiro é a possibilidade de uma rajada se sobrepor sobre o tempo de T_{Offset} de uma ou mais rajadas. O segundo diz respeito à disciplina empregada nos nós OBS que não prevêem prioridade para a primeira rajada que chega ao nó. O modelo empregado para analisar a porta de saída de um nó OBS será baseado nas seguintes considerações:

1. Os rótulos com informações de comutação, reservam recursos destinados à porta do comutador OBS que apresentam uma taxa de chegada de acordo com um processo de Poisson com taxa média λ_R , sendo esta taxa de chegada a taxa total sobre todas as portas de entrada do comutador. Esta consideração é comumente encontrada na literatura [6.2][6.6][6.11].
2. O comprimento das rajadas segue uma distribuição geral com função de distribuição cumulativa (*Cumulative Distribution Function*, CDF) $B(l)$ e transformada de Laplace $B^*(s)$, sendo que $1/\mu$ representa o comprimento médio.
3. O comprimento do T_{offset} das rajadas segue uma distribuição geral com CDF $G(l)$ e transformada de Laplace $G^*(s)$, sendo que T_{offset} representa o seu comprimento médio.
4. A taxa de chegada das rajadas também será considerada como um processo de Poisson com média λ . A maioria dos modelos analíticos emprega a consideração do tráfego na entrada da rede do tipo Poisson [6.28].

A determinação do tempo de serviço efetivo de rajada para a sinalização JIT está indicada na Fig. 6.6. Esta figura ilustra que para uma rajada o comprimento de onda é reservado para a duração da rajada que é igual à soma de dois períodos de tempo. A duração do primeiro período é igual ao T_{offset} e é distribuída de acordo com a CDF $G(s)$ com média T_{offset} . Já a duração do segundo período é igual a duração da rajada e é distribuída de acordo com CDF $B(l)$ com média $1/\mu$. Assim, a transformada de Laplace do tempo de serviço efetivo das rajadas é dada por $B(s)*G(s)$ com média $(T_{offset} + 1/\mu)$ [6.32].

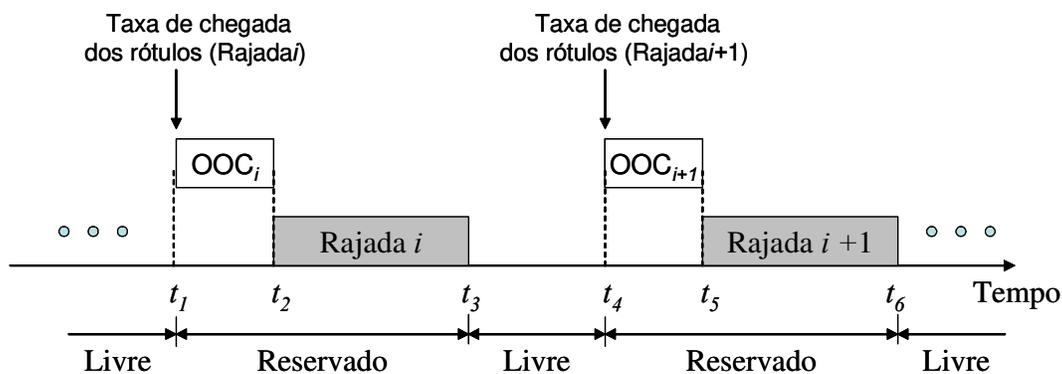


Fig. 6.6. Diagrama de tempo do processo de reserva empregando JIT.

Baseada nestas informações, a porta de saída do nó OBS comporta-se como um sistema de perdas $M/M/W/W$ da teoria de filas, sendo W o número de comprimentos de onda disponível na porta e a intensidade de tráfego é dada por [6.32]:

$$\rho = \lambda \left(\frac{1}{\mu} + T_{Offset} \right) \quad (6.9)$$

Para o estudo do impacto do tempo de processamento dos rótulos ópticos será modelada a porta de saída do nó OBS com W comprimento de onda como um sistema $M/M/W/W$ e o limite superior da probabilidade de perdas de rajadas (BBP) é determinado empregando a formulação de Erlang [6.28], com $r = \rho \cdot W$:

$$BBP = \frac{1/W! \cdot r^W}{\sum_{m=0}^k 1/m! \cdot r^m} \quad (6.10)$$

Na sinalização tipo JIT verifica-se que os resultados analíticos obtidos são muito aproximados dos resultados obtidos por simulação [6.33]. Assim a utilização da modelagem analítica descrito anteriormente apresenta uma boa aproximação para os resultados.

Com intuito de diminuir a probabilidade de perdas de rajadas em redes OBS com processamento eletrônico de rótulos, emprega-se *buffers* baseados em FDL em *crossconnects* OBS. A probabilidade de perdas de rajadas considerando a utilização de buffers pode ser modelada como um processo $M/M/k/D$. Nesta modelagem, D ilustra a capacidade do *buffer* que representa o número de unidades de rajadas que o *buffer* suporta. A probabilidade de perdas de rajadas é dado por [6.28] :

$$BBP^{Buffer} = \frac{r^D}{W^{D-k} \cdot W!} \cdot \frac{1}{\left(\sum_{n=0}^{W-1} \frac{r^n}{n!} + \sum_{n=W}^D \frac{r^n}{W^{n-W} \cdot W!} \right)} \quad (6.11)$$

Neste estudo também será realizada a comparação entre a utilização do processamento óptico dos rótulos e o processamento eletrônico em conjunto com buffers nos comutadores da rede OBS.

6.4 Resultados

A análise de resultados tem início com a determinação do tempo de processamento óptico dos rótulos OOC, este estudo é ilustrado na Fig. 6.7, onde é mostrado tempo de processamento em função do número de códigos OOC para taxas de transmissão de 1,0, 2,5 e 10,0 Gbps e códigos com peso igual a 3, 4 e 5. O tempo de processamento em função do número de códigos OOC ilustrado na Fig. 6.7 é obtido por meio de (6.2).

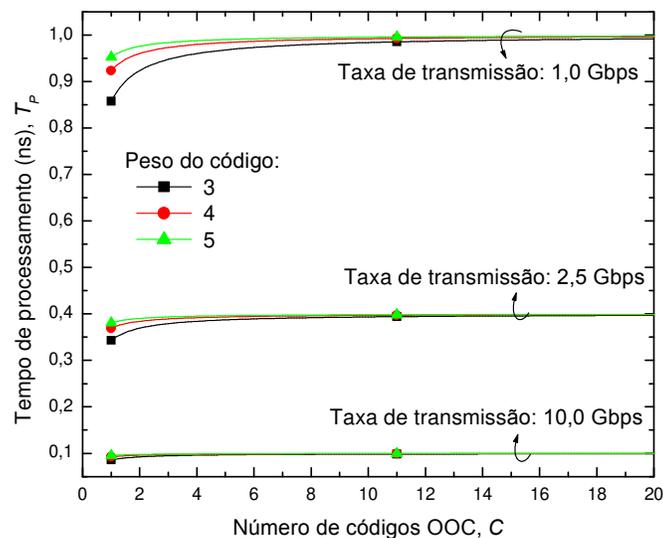


Fig. 6.7. Tempo de processamento em função do número de códigos OOC para taxas de transmissão de 1,0, 2,5 e 10,0 Gbps e peso igual a 3, 4 e 5.

A Fig. 6.7 mostra que o tempo de processamento converge para determinados valores dependendo da taxa de transmissão, não sendo afetado fortemente pelo número e peso dos códigos OOC. Este comportamento ocorre em virtude do tempo de processamento óptico ser limitado somente pela taxa de transmissão [6.15]. Os tempos de processamento óptico convergem para 1,0, 0,4 e 0,1 ns para taxas de transmissão de 1,0, 2,5 e 10,0 Gbps,

respectivamente. O tempo de processamento eletrônico convencional é de $50 \mu\text{s}$ [6.21]. Entre as conseqüências da diminuição do tempo de processamento dos rótulos está a possibilidade de transmissão na rede OBS de rajadas de menor comprimento. Na Fig. 6.8 ilustra-se o comprimento mínimo da rajada permitida na rede em função da taxa de transmissão considerando uma rede óptica com enlaces com 16, 32 e 64 comprimentos de onda. O comprimento mínimo da rajada permitida na rede em função da taxa de transmissão ilustrada na Fig. 6.8 é obtido por meio de (6.8).

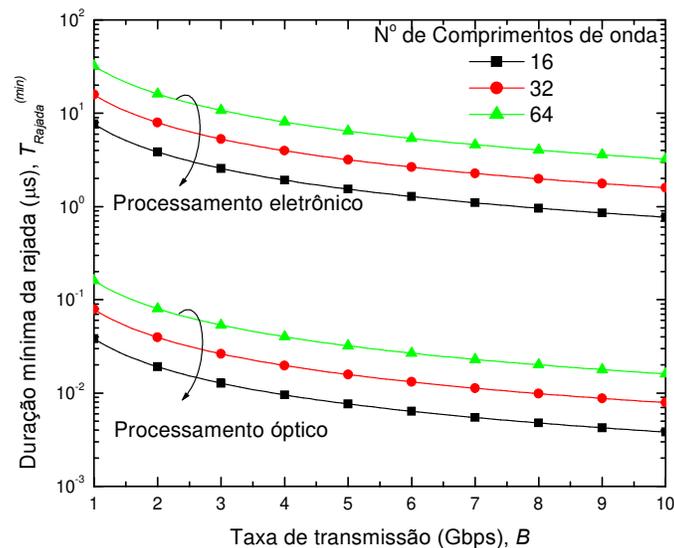


Fig. 6.8. Comprimento mínimo de rajada em função da taxa de transmissão.

A Fig. 6.8 ilustra que o comprimento mínimo das rajadas que podem ser transmitidas numa rede OBS com processamento óptico é na faixa de nanossegundos enquanto que com processamento eletrônico é na faixa de microssegundos. Os valores obtidos nas redes com processamento óptico aumentam a flexibilidade de transmissão de pequenas rajadas proporcionando baixíssima latência na rede. Para efeito de comparação, as redes OBS com processamento eletrônico tradicional transmitem o comprimento mínimo de rajadas de 34, 13 e $3,5 \mu\text{s}$ para as taxas de transmissão de 1,0, 2,5 e 10,0 Gbps numa rede com 64 comprimentos de onda. Por outro lado, empregando o processamento óptico os comprimentos de rajadas obtidos são 160, 60 e 10 ns para as taxas de transmissão de 1,0, 2,5 e 10,0 Gbps numa rede com 64 comprimentos de onda. Conforme foi descrito em [6.3], 50% dos pacotes IP enviados têm duração máxima de 522 bytes que corresponde a rajadas de comprimento de 417 ns numa taxa

de transmissão de 10 Gbps e 50% destes pacotes teriam duração de aproximadamente 42 bytes que corresponde a rajadas de comprimento de 33,6 ns, assim as redes com processamento óptico poderiam transmitir as rajadas de pequeno comprimento sem a necessidade de agregação [6.11]. Porém, um aspecto que deve ser investigado é a taxa de utilização da rede em função do comprimento das rajadas, pois alguns estudos realizados mostram que o tamanho reduzido das rajadas diminui a utilização da rede [6.9][6.20]. A Fig. 6.9 ilustra a utilização da rede em função do comprimento médio das rajadas para as taxas de transmissão de 1,0, 2,5 e 10 Gbps, considerando o processamento óptico e eletrônico dos rótulos. A utilização da rede em função do comprimento médio das rajadas ilustrada na Fig. 6.9 é obtida por meio de (6.4).

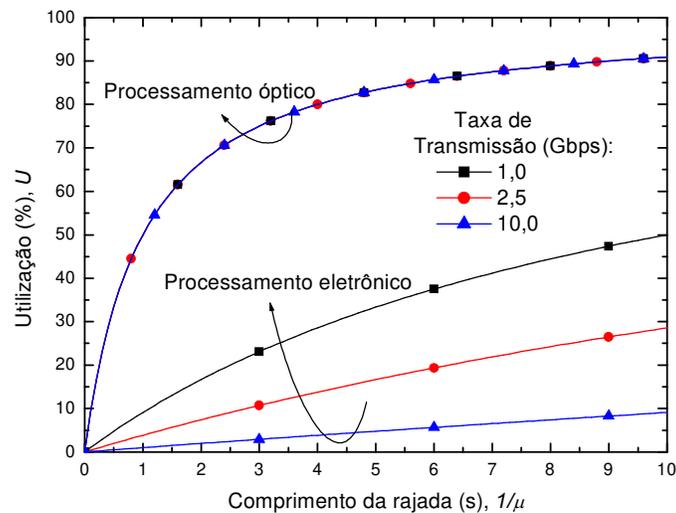


Fig. 6.9. Utilização da rede em função do comprimento médio das rajadas considerando o processamento óptico e eletrônico dos rótulos para taxas de transmissão de 1,0, 2,5 e 10 Gbps.

Por meio da Fig. 6.9, se verifica que a utilização da rede OBS é baixa quando se empregam rajadas de pequeno comprimento, principalmente utilizando o processamento eletrônico dos rótulos. Este comportamento é explicado pelo fato do tempo de comutação das rajadas ser aproximadamente o mesmo tempo de duração das rajadas, ou até mesmo maior [6.27]. Por outro lado, o processamento óptico aumenta sensivelmente a utilização da rede, visto que a diminuição do tempo de processamento aumentará o tempo disponível para os nós ópticos comutarem outras rajadas. Observe também na Fig. 6.9 que a utilização da rede varia pouco com a taxa de transmissão utilizada no caso do processamento óptico, pois o tempo de processamento óptico apresenta uma pequena variação em função da taxa de transmissão, como ilustra a Fig.

6.7. A seguir realiza-se o estudo da probabilidade de perdas de rajadas em função do número de comprimentos de onda disponíveis. Neste estudo foi considerado o comprimento médio das rajadas ($1/\mu$) de 1 ms. Este comprimento é relativamente elevado, porém pode ilustrar de forma comparativa a vantagem de utilizar o processamento óptico de rótulos. Visto que, se fosse utilizado um comprimento médio das rajadas menor, o processamento eletrônico teria um desempenho muito pior. Já o tempo de configuração do OXC (T_{OXC}) de 1 ms, tempo de processamento óptico considerado foi de 0,4 ns para uma taxa de transmissão de 2,5 Gbps, tanto para o canal de controle como para os canais de transmissão de rajadas. Por outro lado, o tempo de processamento eletrônico foi de 50 μ s [6.21]. A Fig. 6.10 ilustra a probabilidade de perdas de rajadas em função do número de comprimento de onda para uma taxa média de chegada ou solicitação de rajadas de $\lambda = 16$ e 32μ para rotas com 5, 10 e 15 enlaces, considerando o processamento eletrônico e o processamento óptico. A probabilidade de perdas de rajadas em função do número de comprimento de onda ilustrada na Fig. 6.10 é obtida por meio de (6.10), sendo a intensidade de tráfego calculada empregando (6.9).

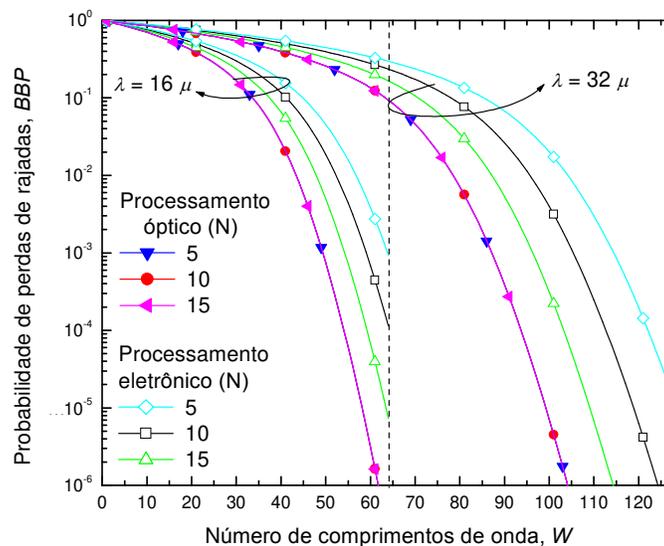


Fig. 6.10. Probabilidade de perdas de rajadas em função do número de comprimento de onda para $\lambda = 16$ e 32μ para rotas com 5, 10 e 15 enlaces.

Por meio da Fig. 6.10 se verifica que a probabilidade de perdas de rajadas é menor quando se emprega o processamento óptico comparado com o processamento eletrônico. Também, se observa que a probabilidade de perdas de rajadas apresenta o mesmo valor no caso do

processamento óptico independentemente do número de enlaces que a rota possui. Este comportamento é explicado pelo pequeno tempo utilizado pelo processamento óptico ($\sim 0,4$ ns), pois dependerá diretamente do número de enlaces multiplicado pelo tempo de processamento. Um resultado que pode ser extraído da Fig. 6.10 é a economia de comprimentos de onda utilizados na rede OBS. Por exemplo, para obtenção de uma probabilidade de perdas de rajadas de 1×10^{-3} no caso de $\lambda = 16\mu$ seriam necessários aproximadamente 64, 59 e 54 comprimentos de onda para rotas com 15, 10 e 5 enlaces, respectivamente, utilizando o processamento eletrônico e 49 comprimentos de onda para rotas com o mesmo número de enlaces empregando o processamento óptico. Considerando um aumento de tráfego, ou seja, $\lambda = 32\mu$ também se verifica que a probabilidade de perdas de rajadas é menor quando se emprega o processamento óptico comparado com o processamento eletrônico. Também, se observa que a probabilidade de perdas de rajadas apresenta o mesmo valor no caso do processamento óptico independentemente do número de enlaces que a rota possui. Também será empregada métrica da economia relativa de comprimentos de onda para quantificar as vantagens do processamento óptico. Para melhor visualizar este efeito será empregada a métrica da economia relativa de comprimentos de onda, definida neste trabalho como:

$$E_W (\%) = \frac{W_{\text{Eletrônico}} - W_{\text{Óptico}}}{W_{\text{Eletrônico}}} \times 100 \quad (6.12)$$

sendo $W_{\text{Eletrônico}}$ e $W_{\text{Óptico}}$ o número de comprimentos de onda empregando o processamento eletrônico e processamento óptico, respectivamente. A Tabela 6.1 ilustra $E_W (\%)$ para as probabilidades de perdas de rajadas de 1×10^{-2} e 1×10^{-3} para rotas com 5, 10 e 15 enlaces e $\lambda = 16\mu$.

Tabela 6.1. Economia relativa de comprimentos de onda ($\lambda = 16\mu$).

Probabilidade de perdas de rajada	$E_W (\%)$		
	5 enlaces	10 enlaces	15 enlaces
1×10^{-2}	8,3	15,4	22,8
1×10^{-3}	7,4	15,3	21,8

Por meio da Tabela 6.1 se verifica que a economia relativa de comprimentos de onda aumenta em função do aumento do número de enlaces na rota. Este comportamento reflete o

menor tempo empregado pelo processamento óptico, pois conforme aumenta o número de enlaces percorridos pelas rajadas aumenta o impacto do tempo utilizado no processamento dos rótulos. Assim, a Tabela 6.2 ilustra E_λ (%) para as probabilidades de perdas de rajadas de 1×10^{-2} e 1×10^{-3} para rotas com 5, 10 e 15 enlaces e $\lambda = 32\mu$.

Tabela 6.2. Economia relativa de comprimentos de onda ($\lambda = 32\mu$).

Probabilidade de perdas de rajada	E_W (%)		
	5 enlaces	10 enlaces	15 enlaces
1×10^{-2}	10,3	16,2	24,3
1×10^{-3}	9,4	16,1	23,7

De acordo com o resultado obtido anteriormente se observa que a economia relativa de comprimentos de onda aumenta em função do aumento do número de enlaces na rota. Os valores obtidos na Tabela 6.1 e Tabela 6.2 são próximos. Entretanto, o maior número de comprimentos de onda disponíveis para a maior intensidade de tráfego eleva a economia relativa de comprimentos de onda para os casos ilustrados nas tabelas. Para ilustrar o aumento da utilização da rede quando se emprega o processamento óptico é ilustrado na Fig. 6.11 o ganho de utilização em função do número de comprimentos de onda para λ igual a 16μ e 32μ , e rotas com 5, 10 e 15 enlaces. Para λ igual a 16μ e 32μ foi limitado o número de comprimentos de onda a 64 e 128, respectivamente. Como foi ilustrado anteriormente, o ganho de utilização é dado pela razão entre a probabilidade de perdas de rajadas empregando o processamento eletrônico e probabilidade de perdas de rajadas empregando o processamento óptico. O ganho de utilização é obtido através do cálculo da probabilidade de perdas de rajadas utilizando (6.10) para os casos de processamento eletrônico e processamento óptico de rótulos. A intensidade de tráfego é calculada empregando (6.9).

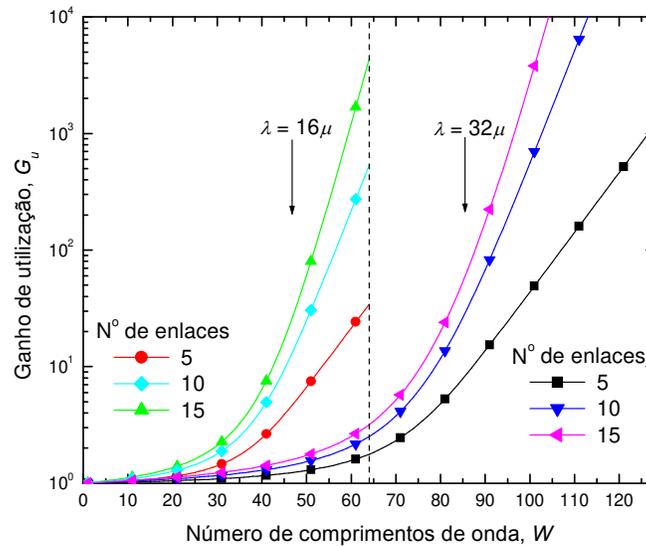


Fig. 6.11. Ganho de utilização em função do número de comprimentos de onda para λ igual a 16μ e 32μ , e rotas com 5, 10 15 enlaces.

Para analisar o efeito do número de enlaces numa rota na probabilidade de perdas de rajadas é ilustrada na Fig. 6.12 a probabilidade de perdas de rajadas em função do número de enlaces numa rota para o processamento eletrônico e processamento óptico. Neste estudo foram considerados os mesmos dados anteriores, porém empregam-se dois cenários. Um cenário possui λ igual a 16μ e utiliza 64 comprimentos de onda e o outro cenário possui λ igual a 32μ e utiliza 128 comprimentos de onda. A probabilidade de perdas de rajadas em função do número de enlaces ilustrada na Fig. 6.12 é obtida por meio de (6.10).

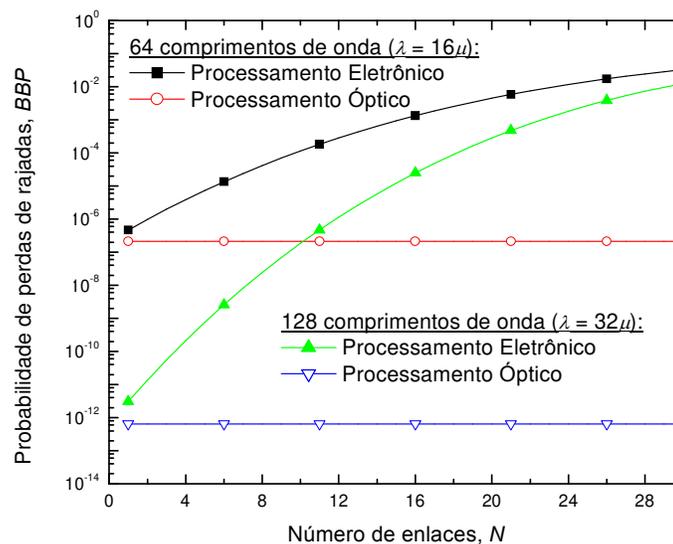


Fig. 6.12. Probabilidade de perdas de rajadas em função do número de enlaces numa rota.

A Fig. 6.12 ilustra que a probabilidade de perdas de rajadas para o cenário com 128 comprimentos de onda é menor quando comparada com o cenário que possui 64 comprimentos de onda. Este comportamento é normal em função do maior número de recursos fornecidos ao cenário com 128 comprimentos de onda. Por outro lado, se observa que a probabilidade de perdas de rajadas aumenta em função do número de enlaces quando se emprega o processamento eletrônico, já a probabilidade de perdas de rajadas em função do número de enlaces quando se emprega o processamento óptico mantém-se constante e num valor menor que o do processamento eletrônico. Desta forma, se verifica que empregando o processamento eletrônico haveria a perda de rajadas quando ocorrer o aumento do número de enlaces. Nas redes OBS, como também em outras redes, existe o controle do número de enlaces percorridos pela rajada, pois se a rajada percorrer um número muito grande de enlaces, mesmo que seja em redes que empregam roteamento por deflexão para diminuir a probabilidade de perdas de rajadas, pode ocorrer a perda dos requisitos de QoS da rajada ocorrendo o seu descarte.

Até este ponto de análise dos resultados foi ilustrada a vantagem do emprego do processamento óptico dos rótulos comparado com o processamento eletrônico no intuito da diminuição da probabilidade de perdas de rajadas e por consequência uma economia nos recursos da rede, que neste caso são os comprimentos de onda. Por outro lado, este estudo também tem por objetivo analisar o efeito do processamento óptico com relação às características de tráfego oferecido à rede. Um dos parâmetros que influenciam no projeto de redes OBS é o comprimento das rajadas aceitas pela rede, pois em redes OBS convencionais os pacotes de pequeno comprimento que chegam aos nós de ingresso são agregados com pacotes de mesmo destino para que a rajada tenha o comprimento adequado para ser transportada. Nos nós de borda são empregados algoritmos que definem as técnicas de agregação e preenchimento das rajadas. Como foi ilustrado na Fig. 6.8 uma das vantagens do emprego do processamento óptico é a possibilidade da rede aceitar rajadas com menor comprimento e mesmo assim conseguir uma boa utilização da rede como mostra a Fig. 6.9. Assim, a seguir realiza-se o estudo da probabilidade de perdas de rajadas em função do comprimento médio das rajadas para analisar as características ilustradas. Neste estudo foram considerados os mesmos dados utilizados anteriormente. A Fig. 6.13 ilustra a probabilidade de perdas de rajadas em função do comprimento médio das rajadas para uma taxa média de chegada 16 e 32μ para rotas com 5, 10 e 15 enlaces, considerando o processamento eletrônico e o processamento óptico. Foram

considerados 64 comprimentos de onda disponíveis. A probabilidade de perdas de rajadas em função do comprimento médio da rajada ilustrada na Fig. 6.13 é obtida por meio de (6.10), sendo a intensidade de tráfego calculada empregando (6.9).

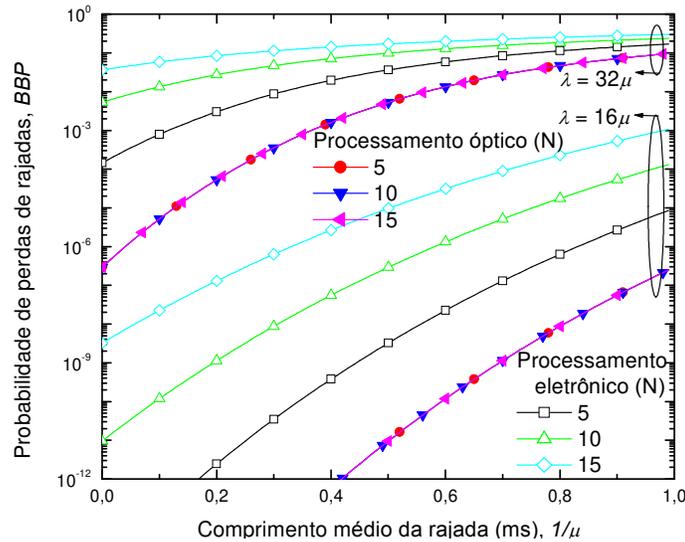


Fig. 6.13. Probabilidade de perdas de rajadas em função do comprimento médio das rajadas para uma taxa média de chegada ou solicitação de rajadas de $\lambda = 16$ e 32μ .

Por meio da Fig. 6.13 se observa que a probabilidade de perdas de rajadas aumenta em função do aumento do comprimento médio das rajadas. Porém, se verifica que a probabilidade de perdas de rajadas é menor quando se emprega o processamento óptico dos rótulos, principalmente para rajadas de pequeno comprimento. Assim, se observa que para rajadas de pequeno comprimento a probabilidade de perdas de rajadas empregando o processamento óptico é sensivelmente menor quando comparada ao processamento convencional eletrônico. Também se verifica que a probabilidade de perdas de rajadas não varia em função do número de enlaces na rota para o processamento óptico.

Outra forma de ilustrar a vantagem da utilização do processamento óptico é mostrar a capacidade necessária do *buffer* para uma rede OBS com processamento eletrônico apresentar o mesmo desempenho, em termos de probabilidade de perdas de rajadas, que uma rede OBS com processamento óptico. Este estudo é ilustrado na Fig. 6.14 considerando os mesmos dados utilizados na Fig. 6.13. A capacidade do *buffer* em função do comprimento médio da rajada

ilustrada na Fig. 6.14 é obtida por meio da resolução recursiva (6.11), sendo a intensidade de tráfego calculada empregando (6.9).

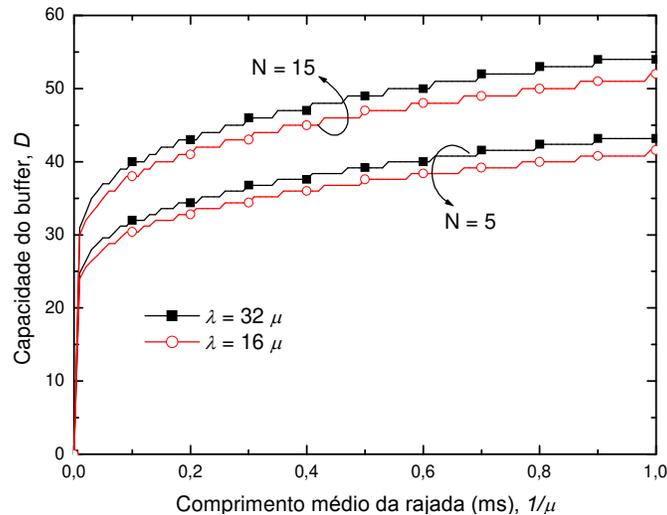


Fig. 6.14. Capacidade de *buffer* em função do comprimento médio da rajada para redes OBS com processamento eletrônico. Número de enlaces 5 e 15 e taxa média de solicitação de rajadas de 16 e 32 μ .

Por meio da Fig. 6.14 se verifica a capacidade de *buffer* em função do comprimento médio da rajada. O resultado mostra que o aumento do comprimento da rajada implica no aumento da capacidade do *buffer*, mesmo que a diferença entre a probabilidade de perdas de rajadas obtida com processamento eletrônico e óptico seja pequeno. Por outro lado, pode-se observar que o aumento da taxa média de chegada de rajadas e aumento do número de enlaces na rota óptica resulta no aumento da capacidade do *buffer*. Entretanto, um dos principais resultados obtidos é a inviabilidade física de se obter *buffers* que possuam a capacidade suficiente para emprego em conjunto com o processamento eletrônico. Por exemplo, para se obter a mesma probabilidade de perdas de rajadas empregando o processamento eletrônico para uma rota óptica com 15 enlaces e taxa média de chegada igual a 32 μ para rajadas com 0,4 ms seria preciso um *buffer* com capacidade de 47. Para obter um *buffer* com esta capacidade seria necessário um comprimento de 80 km de fibra de sílica que se torna inviável. Portanto, os resultados ilustram que a utilização do processamento ópticos dos rótulos é mais eficiente e tecnicamente viável quando comparado com utilização do processamento eletrônico dos rótulos em conjunto com *buffers* nos comutadores da rede.

6.5 Sumário

Neste capítulo foi proposta e analisada uma arquitetura de rede comutada por rajadas empregando rótulos de códigos OOC. A análise realizada mostrou que as redes ópticas comutadas por rajadas apresentam as características e as vantagens das redes comutadas por pacotes com a viabilidade de implementação da tecnologia desenvolvida atualmente. Entretanto, as redes de rajadas apresentam baixa utilização quando rajadas de pequeno comprimento são transmitidas na rede em função do atraso gerado pelo processamento eletrônico dos rótulos. Uma das soluções apresentadas na literatura é o emprego de rótulos compostos por códigos ópticos coerentes. Porém estes códigos apresentam elevada complexidade de implementação. Neste contexto, foi proposta uma arquitetura baseada no processamento óptico de rótulos compostos por códigos OOC. Esta arquitetura foi descrita considerando a utilização da sinalização de reserva de recursos empregando o protocolo JIT que apresenta maior viabilidade de implementação e também resultados de análise precisos quando se empregam modelos analíticos para a análise de desempenho da rede. Os principais resultados obtidos mostram a vantagem do emprego do processamento óptico dos rótulos comparado com o processamento eletrônico com respeito à diminuição da probabilidade de perdas de rajadas e por consequência uma economia nos recursos da rede, que neste caso são os comprimentos de onda. Portanto, os resultados sugerem que o processamento óptico pode ser empregado para aumentar a capacidade das redes OBS. Outros resultados também ilustram que a probabilidade de perdas de rajadas empregando o processamento óptico é sensivelmente menor quando comparado ao processamento convencional eletrônico para rajadas de pequeno comprimento. Desta forma, rajadas de pequeno comprimento que seriam bloqueadas em redes OBS com processamento convencional são transmitidas em redes OBS com processamento óptico. Uma análise global mostra que a rede OBS com processamento óptico de rótulos possui granularidade próxima a das redes comutadas por pacotes, porém sem as suas principais limitações.

Capítulo 7

Conclusões e Trabalhos Futuros

7.1 Conclusões

Neste trabalho foi investigada a utilização de códigos ópticos da tecnologia de multiplexação por divisão de códigos (OCDM) em redes ópticas com tecnologia de multiplexação por divisão de comprimentos de onda (WDM). A principal motivação da utilização do OCDM é a possibilidade do emprego do processamento óptico dos códigos ópticos na camada de transporte em redes ópticas híbridas WDM/OCDM como em redes OBS com sinalização de rótulos baseados em códigos ópticos. Foi escolhida a utilização dos códigos ópticos ortogonais (OOC) em decorrência de suas características de auto-correlação, correlação-cruzada e simplicidade construção e implementação. A seguir são ilustradas as principais conclusões agrupadas em capítulos em função dos tópicos abordados.

No Capítulo 3 foi realizada a proposta e análise do emprego da tecnologia WDM/OCDM como camada de transporte para redes WR-OBS com o objetivo de aumentar a eficiência de utilização e redução da latência das rajadas na rede. A contribuição da tese neste capítulo foi a utilização da tecnologia WDM/OCDM como camada de transporte para redes WR-OBS. Os principais resultados mostram que a probabilidade de perdas de rajadas e a latência no roteador de borda diminuem a medida que ocorre o aumento do número de códigos OOC em redes WDM/OCDM. Porém, existe a limitação de aumento do número de códigos OOC em função dos efeitos da MAI. Os

resultados da análise do desempenho da rede em função dos atrasos mostram que as redes WDM/OCDM apresentam um tempo de utilização dos canais virtuais aproximadamente constante, comparado com o tempo de utilização crescente das redes WDM. Com relação a re-utilização dos canais disponíveis, que representa uma otimização dos recursos, observou-se que a re-utilização de canais é maior nas redes WDM/OCDM comparada com redes WDM em consequência do maior número de canais disponíveis.

No Capítulo 4 foi estudada a utilização de comutadores OXC WDM/OCDM em redes ópticas WDM/OCDM. A contribuição da tese neste capítulo foi o desenvolvimento de um modelo que ilustra o desempenho do OXC considerando os efeitos da MAI e dos parâmetros dos códigos OOC. Os resultados obtidos ilustram o desempenho de um OXC WDM/OCDM considerando os efeitos do número de códigos ópticos por comprimento de onda, peso do código e nível de limiar. Estes resultados mostram que tanto o valor otimizado de limiar como o elevado peso dos códigos diminui a BER no processo de correlação. A utilização de códigos com elevado peso implica na diminuição da BER e da PER em função do aumento da auto-correlação. Por outro lado, foi ilustrado que aumento do comprimento dos pacotes transmitidos resulta no aumento da PER. Este efeito ocorre função do aumento da probabilidade de sobreposição dos pacotes transportados por códigos distintos.

No Capítulo 5 foi estudado o emprego das redes WDM/OCDM como camada de transporte considerando os efeitos da PMD que, como consequência da dificuldade de sua compensação, consiste uma das principais limitações das redes ópticas com elevada capacidade de transmissão. A contribuição da tese neste capítulo foi na determinação dos efeitos da PMD em redes híbridas e rotas ópticas WDM/OCDM. Assim verificou-se a restrição da limitação dos comprimentos dos enlaces em função da PMD relacionada com os parâmetros dos códigos OOC, que ainda não havia sido abordada na literatura. Os principais resultados mostram que o aumento da taxa de transmissão, bem como o aumento do peso dos códigos OOC, tem grande impacto no aumento da probabilidade de bloqueio e probabilidade de perdas de pacotes em redes WDM/OCDM e rotas WDM/OCDM, respectivamente.

No Capítulo 6 foi proposta uma arquitetura de rede óptica de rajada (OBS) que emprega códigos OOC como rótulos na sinalização tipo JIT. A contribuição da tese neste capítulo foi a proposta de uma arquitetura para este tipo de rede e a metodologia de análise

desenvolvida. Os principais resultados obtidos mostram a vantagem do emprego do processamento óptico dos rótulos comparado com o processamento eletrônico no intuito da diminuição da probabilidade de perdas de rajadas, aumento da utilização e por conseqüência, uma economia nos recursos da rede. Outro importante resultado, foi a verificação que este tipo de rede pode transportar rajadas com uma granularidade próxima das redes de pacotes.

Em função dos resultados apresentados nesta tese, verifica-se que a aplicação dos códigos ópticos OOC nas redes ópticas de transporte WDM/OCDM, redes de rajadas e redes WR-OBS, tanto como canais para escoamento do tráfego ou como rótulos para a sinalização, aumenta o desempenho destas redes por meio da diminuição da probabilidade de perdas de pacotes, latência dos pacotes e aumento da utilização da rede. Portanto, verifica-se que a tecnologia OCDM pode ser empregada em conjunto com a tecnologia WDM para a obtenção de redes ópticas que possam comportar o aumento constante de tráfego de forma flexível e eficiente.

7.2 Sugestões para Trabalhos Futuros

Para o desenvolvimento de trabalhos futuros baseados nos resultados apresentados nesta tese podem-se realizar as seguintes abordagens:

1. No estudo das redes ópticas WR-OBS apresentado no Capítulo 3 podem-se empregar simulações considerando as características aleatórias do tráfego e as técnicas de agregação de pacotes nos roteadores de borda. Além disso, as simulações podem considerar técnicas de gerenciamento da rede empregando engenharia de tráfego para obtenção de garantias de QoS e CoS para os pacotes que ingressarem na rede.

2. No estudo realizado no Capítulo 5 poderiam ser desenvolvidos modelos matemáticos que consideram outras restrições além da PMD, como restrições não-lineares das fibras ópticas, dispositivos ópticos não ideais e ruídos provenientes dos amplificadores EDFA. Por outro lado, podem ser empregados códigos com comprimento variável, por exemplo na configuração OVSF (*Orthogonal Variable Spread Factor*) para diminuir o

impacto da PMD em enlaces por meio do gerenciamento do comprimento dos códigos neste enlace.

3. Na arquitetura de rede apresentada no Capítulo 6 poderiam ser utilizados códigos OOC com peso variável como os códigos propostos em [2.41][2.43] para obtenção de classes de QoS por meio do processamento óptico destes códigos. Além desta proposta, o estudo que foi realizado baseado na modelagem analítica de um roteador poderia ser ampliado por meio de simulação para o estudo do impacto do processamento óptico em uma rede óptica.

Referências Bibliográficas

- [1.1] K. Makki, J. Broussard e N. Pissinou, “On optical communications networks and wideband network architecture”, *Computer Communications*, vol. 23, pp. 901 – 911, maio de 2000.
- [1.2] R. C. Alferness, P. A. Bonenfant, C. J. Newton, K. A. Sparks e E. L. Varma, “A practical vision for optical transport networking”, *Bell Labs Technical Journal*, pp. 3 – 17, janeiro/março de 1999.
- [1.3] F. Xue e S. Yoo, “High-Capacity Multiservice Optical Label Switching for the Next-Generation Internet”, *IEEE Optical Communications*, pp. S16 – S22, maio de 2004
- [1.4] S. Yoo et al, High-Performance Optical-Label Switching Packet Routers and Smart Edge Routers for Next-Generation Internet, *IEEE Journal on Selected Areas in Communication*, vol. 21, n. 7, pp. 1041 – 1051, setembro de 2003
- [1.5] Daniel J. Blumenthal, “All-Optical Label Swapping Networks and Technologies”, *Journal of Lightwave Technology*, vol. 18, n. 12, pp. 2058 – 2075, dezembro de 2000.
- [1.6] R. Ramaswami and K.N. Sivarajan, *Optical Networks: a Practical Perspective*, Morgan Kauffmann Publishers, 1998.
- [1.7] F. Callegati, H. Cankaya, Y. Xiong e M. Vandenhoute, “Design Issues of Optical IP Routers for Internet Backbone Applications”, *IEEE Communications Magazine*, pp. 124 – 128, dezembro de 1999.
- [1.8] Ayan Banerjee et al, “Generalized Multiprotocol Label Switching: An Overview of Routing and Management Enhancements”, *IEEE Communications Magazine*, pp. 144 – 150, janeiro de 2001.
- [1.9] C. S. Ram Murthy and M. Gurusamy, *WDM Optical Networks: Concepts, Design, and Algorithms*, Prentice Hall, Upper Saddle River, 2002.
- [1.10] J. Downie e A. Ruffin, “Analysis of Signal Distortion and Crosstalk Penalties Induced by Optical Filters in Optical Networks”, *Journal Lightwave Technology*, vol. 21, n. 11, pp. 1876 – 1886, setembro de 2003.
- [1.11] C. Qiao and M. Yoo, “Optical burst switching (OBS)-A new paradigm for an optical internet,” *Journal of High Speed Networks*, vol. 8, no. 1, pp. 69 – 84, 1999.
- [1.12] M. Duser e Polina Beyvel, “Analysis of Dynamically Wavelength-Routed Optical Burst Switched Network Architecture”, *Journal of Lightwave Technology*, vol. 20, no. 4, pp. 574 – 585, abril de 2002.

- [1.13] K. Kitayama, H. Sotobayashi and N. Wada, “Optical Code Division Multiplexing (OCDM) and its applications to Photonic Networks”, *IEICE Transactions Fundamentals*, vol. E82 A, n. 12, pp. 2616 – 2626, dezembro de 1999.
- [1.14] E. Mutafungwa, “Comparative Analysis of the Traffic Performance of Fiber-Impairment Limited WDM and Hybrid OCDM/WDM Networks”, *Photonics Network Communication*, vol.13, n. 9, pp. 53 – 66, setembro de 2006.
- [1.15] A. Dal Forno, A. Paradisi, R. Passy e J. von der Weid, “Experimental and Theoretical Modeling of Polarization-Mode Dispersion in Single-Mode Fibers”, *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 12, n. 3, pp. 296 – 298, março de 2000.
- [1.16] A. Belahlou, “Fiber Design Considerations for 40 Gb/s Systems”, *Journal of Lightwave Technology*, vol. 20, n. 12, pp. 2290 – 2305, dezembro de 2002.
- [1.17] F. Chung, J. Salehi and V. Wei, “Optical Orthogonal Codes: Design, Analysis, and Applications”, *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 35, no. 3, pp. 595 – 604, maio de 1989.
- [1.18] N. Tarhuni, T. Korhonen, E. Mutafungwa, M. Elmusrati, “Multiclass Optical Orthogonal Codes for Multiservice Optical CDMA Networks”, *Journal of Lightwave Technology*, vol. 24, n. 2, pp. 694 – 704, fevereiro de 2006.
- [1.19] F. Gu e J. Wu, “Construction and Performance Analysis of Variable-Weight Optical Orthogonal Codes for Asynchronous Optical CDMA Systems”, *Journal of Lightwave Technology*, vol. 23, n. 2, pp. 740 – 748, fevereiro de 2005
- [2.1] J. Refi, “Optical Fibers for Optical Networking”, *Bell Labs Technical Journal*, pp. 246 – 261, janeiro/março de 1999.
- [2.2] G. P. Agrawal, *Fiber-Optic Communication Systems*, New York, Wiley-Interscience, 2002.
- [2.3] H. Yoshimura, K. Sato e N. Takachio, “Future Photonic Transport Networks Based on WDM Technologies”, *IEEE Communications Magazine*, pp. 74 – 81, fevereiro de 1999.
- [2.4] F. Durand, “Projeto e modelagem de um filtro para retirada de comprimentos de onda utilizando duplo refletor de Bragg e guias ARROW em fibras tipo D para aplicações em WDM”, agosto de 2002, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade Estadual de São Paulo, Brasil.
- [2.5] Y. Hibino, “Passive Optical Devices for Photonic Networks”, *IEICE Transactions Communications*, vol. E83-B, n. 10, pp. 2178 – 2190, outubro de 2000.
- [2.6] <http://www.nec.co.jp/press/en/0103/2201.html>, último acesso junho de 2006.

- [2.7] C. S. Ram Murthy e M. Gurusamy, *WDM Optical Networks: Concepts, Design, and Algorithms*, Prentice Hall, Upper Saddle River, 2002.
- [2.8] Y. Chen, C. Chang, Y. Yang, I. Kuo e T. Laing, “Mach-Zehnder Fiber-Gratings-Based Fixed and Reconfigurable Multichannel Optical Add-Drop Multiplexers for DWDM networks”, *Optics Communications*, n. 169, pp. 245 – 262, outubro de 1999.
- [2.9] A. Willner, M. Cardakli, H. Adamczyk, Y. Song e D. Gurkan, “Key Building Blocks for All-Optical Networks”, *IEICE Transactions Communications*, vol. E83-B, n. 10, outubro de 2000.
- [2.10] http://www.calient.net/files/DW_PXC_May2004.pdf, último acesso junho de 2006.
- [2.11] J. Elmirghani and T. Mouftah, “Technologies and Architectures for Scalable Dynamic Dense WDM Networks”, *IEEE Communications Magazine*, pp. 58 – 66, fevereiro de 2000.
- [2.12] R. Ramaswami and K.N. Sivarajan, *Optical Networks: a Practical Perspective*, Morgan Kauffmann Publishers, 1998.
- [2.13] X. Cao, V. Anand, X. Xiong e C. Qiao, “Performance Evaluation of Wavelength Band Switching in Multi-Fiber All-Optical Networks”, *IEEE INFOCOM 2003*.
- [2.14] K. Liu, C. Liu, J. Pastor, A. Roy e J. Wei, “Performance and Testbed Study of Topology Reconfiguration in IP over Optical Networks”, *IEEE Transactions on Communications*, vol. 50, n. 10, outubro de 2002.
- [2.15] B. Rajagopalan, D. Pendarakis, D. Saha, R. Ramamoorthy e K. Bala, “IP over Optical Networks: Architectural Aspects”, *IEEE Communications Magazine*, pp. 94 – 102, setembro de 2000.
- [2.16] A. Jajszczyk, “Automatically Switched Optical Networks: Benefits and Requirements”, *IEEE Optical Communications*, pp. S-10 – S-15, fevereiro de 2004.
- [2.17] Ayan Banerjee et al, “Generalized Multiprotocol Label Switching: An Overview of Routing and Management Enhancements”, *IEEE Communications Magazine*, pp. 144 – 150, janeiro de 2001.
- [2.18] F. Xue e S. Yoo, “High-Capacity Multiservice Optical Label Switching for the Next-Generation Internet”, *IEEE Optical Communications*, pp. S16 – S22, maio de 2004.
- [2.19] S. Yoo et al, High-Performance Optical-Label Switching Packet Routers and Smart Edge Routers for Next-Generation Internet, *IEEE Journal on Selected Areas in Communication*, vol. 21, n. 7, pp. 1041 – 1051, setembro de 2003.

- [2.20] D. Blumenthal et al, "All-Optical Label Swapping Networks and Technologies", *Journal of Lightwave Technology*, vol. 18, n. 12, pp. 2058 – 2075, dezembro de 2000.
- [2.21] I. Monroy, A. M. J Koonen, J. Zhang, N. Chi, P. v. Holm-Nielsen, C. Peucheret, J. J. Olmos e G-D Khoe, "Techniques for Labeling of Optical Signals in Burst Switched Networks", *Workshop of Optical Burst Switch (WOBS)*, Dallas, USA, 2003.
- [2.22] D. Hunter e I. Andonovic, "Approaches to Optical Internet Packet Switching", *IEEE Communications Magazine*, pp. 116 – 122, setembro de 2000.
- [2.23] C.Guillemot, M.Renaud et al, "Transparent optical packet switching: the European ACTS KEOPS project approach", *Journal of Lightwave Technology* vol. 16, n.12, pp. 2117 – 2134, dezembro de 1998.
- [2.24] Kapil V. Shrikhande, I. M. White, M. S. Rogge, F-T. An, A. Srivatsa, E.S. Hu, S. S-H. Yam and Leonid G. Kazovsky, "Performance Demonstration of a Fast-Tunable Transmitter and Burst-Mode Packet Receiver for HORNET," *Optical Fiber Communication Conference (OFC)*, paper ThG2, Anaheim, California, fevereiro de 2001.
- [2.25] Y. M. Lin, W. I. Way, and G. K. Chang, "A Novel Optical Label Swapping Technique Using Erasable Optical Single-Sideband Subcarrier Label", *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 12, No. 8, pp. 1088 – 1090, agosto de 2000.
- [2.26] K. Kitayama, "Code Division Multiplexing Lightwave Networks Based upon Optical Code Conversion", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 16, n. 7, pp.1309 – 1319, setembro de 1998.
- [2.27] H. Sotobayashi, W. Chujo e K. Kitayama, "Transparent Virtual Optical Code/Wavelength Path Network", *IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 8, n. 3, pp.699 – 704, maio/junho de 2002.
- [2.28] J. Refi, Optical fibers for optical networking, *Bell Labs Technical Journal*, pp. 246 – 261, janeiro/março de 1999.
- [2.29] N. Khrais, A. Elrefaie, R. Wagner e S. Ahmed, "Performance degradation of multiwavelength optical networks due to laser and (de)multiplexer misalignments," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 7, n.11, pp. 1348–1350, novembro de 1995.
- [2.30] J. Downie e A. Ruffin, "Analysis of Signal Distortion and Crosstalk Penalties Induced by Optical Filters in Optical Networks", *Journal of Lightwave Technology*, vol. 21, n. 11, pp. 1876 – 1886, setembro de 2003.

- [2.31] C. S. Ram Murthy and M. Gurusamy, *WDM Optical Networks: Concepts, Design, and Algorithms*, Prentice Hall, Upper Saddle River, 2002.
- [2.32] N. Karafolas e D. Uttamchandani, “Optical Fiber Code Division Multiple Access Networks: A Review”, *Optical Fiber Technology*, n. 2, pp. 149 – 168, fevereiro de 1996.
- [2.33] A. Stok e E. Sargent, “Lighting the Local Area: Optical Code-Division Multiple Access and Quality of Service Provisioning”, *IEEE Network*, pp. 42 – 46, dezembro de 2000.
- [2.34] I. Djordjevic e B. Vasic, “Combinatorial Constructions of Optical Orthogonal Codes for OCDMA Systems”, *IEEE Communications Letters*, vol. 8, n. 6, pp. 391 – 393, junho de 2004.
- [2.35] R. Scholtz, “The Spread Spectrum Concept”, *IEEE Transactions on Communications*, vol. 25, n. 8, pp. 748, agosto de 1977.
- [2.36] W. Huang, M. Nizan, I. Andonovic e M. Tur, “Coherent Optical CDMA (OCDMA) Systems Used for High-Capacity Optical Fiber Networks – System Description, OTDMA Comparison, and OCDMA/WDMA Networking”, *Journal of Lightwave Technology*, vol. 18, n. 6, pp. 765 – 778, junho de 2000.
- [2.37] P. Prucnal, M. Santoro e T. Fan, “Spread Spectrum Fiber-Optic Local Area Network Using Optical Processing”, *Journal of Lightwave Technology*, vol. 4, n. 5, pp. 547 – 554, maio de 1986.
- [2.38] S. Tamura, S. Nakano e K. Akazaki, “Optical Code-Multiplex Transmission by Gold Codes”, *Journal of Lightwave Technology*, vol. 3, n. 2, pp. 121 – 127, fevereiro de 1985.
- [2.39] J. Salehi e C. Brackett, “Code Division Multiple-Access Techniques in Optical Fiber Networks-Part II: Systems Performance Analysis”, *IEEE Transactions on Communications*, vol. 37, n. 8, pp. 834 – 842, agosto de 1989.
- [2.40] F. Chung, J. Salehi e V. Wei, “Optical Orthogonal Codes: Design, Analysis, and Applications”, *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 35, n. 3, maio de 1989.
- [2.41] N. Tarhuni, T. Korhonen, E. Mutafungwa, M. Elmusrati, “Multiclass Optical Orthogonal Codes for Multiservice Optical CDMA Networks”, *Journal of Lightwave Technology*, vol. 24, n. 2, pp. 694 – 704, fevereiro de 2006.
- [2.42] A. Neto, “Proposta de Códigos Ortogonais para Sistemas OCDMA”, tese de doutorado, julho de 2005, Faculdade de Engenharia Elétrica e Engenharia da Computação da Universidade Estadual de Campinas, Brasil.

- [2.43] F. Gu e J. Wu, “Construction and Performance Analysis of Variable-Weight Optical Orthogonal Codes for Asynchronous Optical CDMA Systems”, *Journal of Lightwave Technology*, vol. 23, n. 2, pp. 740 – 748, fevereiro de 2005.
- [2.44] G. Yang e W. Kwong, “Performance Comparison of Multiwavelength CDMA and WDMA + CDMA for Fiber-Optic Networks”, *IEEE Transactions on Communications*, vol. 45, n. 11, pp. 1426 – 1434, novembro de 1997.
- [2.45] T. Stern e K. Bala, *Multiwavelength Optical Networks: A Layered Approach*, Addison-Wesley, Reading, 1999.
- [2.46] S. Zahedi e J. Salehi, “Analytical Comparison of Various Fiber-Optic CDMA Receiver Structures”, *Journal of Lightwave Technology*, vol. 18, n. 12, pp. 1718 – 1727, dezembro de 2000.
- [2.47] F. Khaleghi e M. Kavehrad, “A New Correlator Receiver Architecture for Noncoherent Optical CDMA Networks with Bipolar Capacity”, *IEEE Transactions on Communication*, vol. 44, n. 10, pp. 1335 – 1339, outubro de 1996.
- [3.1] F. Farahmand, Q. Zhang e J. Jue, “Dynamic Traffic Grooming in Optical Burst-Switched Networks”, *Journal of Lightwave Technology*, vol. 23, n. 10, pp. 3167 – 3177, outubro de 2005.
- [3.2] S. Sheeshia, Y. Chen, V. Anand, e C. Qiao, “Performance Comparison of OBS and SONET in Metropolitan Ring Networks”, *IEEE Journal of Select Areas in Communications*, Vol. 22, no. 8, pp. 1474 – 1482, outubro de 2004.
- [3.3] M. Duser e P. Beyvel, “Analysis of Dynamically Wavelength-Routed Optical Burst Switched Network Architecture”, *Journal of Lightwave Technology*, vol. 20, no. 4, pp. 574 – 585, abril de 2002.
- [3.4] M. Duser e P. Beyvel, “Performance of Dynamically Wavelength-Routed Optical Burst Switched Network”, *IEEE Photonic Technology Letters*, vol. 14, no. 2, pp. 239 – 241, fevereiro de 2002.
- [3.5] I. Miguel, E. Kozlovski e P. Bayvel, “Provision of End-to-End Delay Guarantees in Wavelength-Routed Optical Burst-Switched Networks”, *Optical Networking Design and Modeling (ONDM)*, Torino, Italy, 2002.
- [3.6] Z. Rosberg, H. Vu, M. Zukerman e J. White, “Performance Analyses of Optical Burst-Switching Networks”, *IEEE Journal of Selected Areas in Communications*, vol. 21, no. 7, pp. 1187 – 1197, setembro de 2003.
- [3.7] M. Düser e P. Bayvel, “Analysis of Wavelength-Routed Optical Burst-Switched Network Performance”, *Fiber and Integrated Optics*, vol. 21, n. 6, pp. 471 – 477, novembro de 2002.

- [3.8] M. Düser, I. de Miguel, P. Bayvel and D. Wischik, “Timescale analysis for wavelength-routed optical burst-switched (WR-OBS) networks”, *Optical Fiber Conference (OFC)*, Anaheim, USA, 2002.
- [3.9] M. Yoo, C. Qiao e S. Dixit, “Qos Performance of Optical Burst Switching in IP-Over-WDM Networks”, *IEEE Journal of Selected Areas in Communications*, vol. 18, n. 10, pp. 2062 – 2071, outubro de 2000.
- [3.10] K. Dolzer, C.M. Gauger, J. Späth e S. Bodamer, “Evaluation of reservation mechanisms for optical burst switching” *AEÜ International Journal of Electronics and Communicatios*, vol. 55, n. 1, pp. 1 – 6, janeiro de 2001.
- [3.11] H. Sotobayashi, W. Chujo e K. Kitayama, “Transparent Virtual Optical Code/Wavelength Path Network”, *IEEE Journal of Selected Areas in Communications*, vol. 8, n. 3, pp. 699 – 704, maio/junho de 2002.
- [3.12] S. Chuang, A. Goel, N. McKeown e B. Prabhakar, “Matching output queueing with combined input/output-queued switch”, *IEEE Journal of Selected Areas in Communications*, vol. 17, n. 6, pp. 1030 – 1039, junho de 1999.
- [3.13] M. Zukerman, E. Wong, Z. Rosberg, G. Lee e H. Vu, “On Teletraffic Applications to OBS”, *IEEE Communications Letters*, vol. 8, n. 2, pp. 116 – 118, fevereiro de 2004.
- [3.14] A. Zalesky, E. Wong, M. Zukerman, H. Vu e R. Tucker, “Performance Analysis of an OBS Edge Router”, *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 16, no. 2, pp. 695 – 697, fevereiro de 2004.
- [4.1] X. Zhang, Y. Ji e X. Chue, “Code Routing Technique in Optical Network”, APCC/OECC’99, Beijing, China, 1999
- [4.2] H. Sotobayashi, W. Chujo e K. Kitayama, “Transparent Virtual Optical Code/Wavelength Path Network”, *Journal on Selected Areas in Communication*, vol. 8, n. 3, pp. 699 – 704, maio/junho de 2002.
- [4.3] K. Kitayama e M. Murata, “Versatile Optical Code-Based MPLS for Circuit, Burst and Packet Switchings”, *Journal of Lightwave Technology*, vol. 21, n. 11, pp. 2573 – 2764, novembro de 2003.
- [4.4] M. Murata e K. Kitayama, “A Perspective on Photonic Mutiprotocol Label Switching”, *IEEE Network*, Vol. 15, n. 4, pp. 56 – 63, julho/agosto de 2001.
- [4.5] K. Kitayama, “Code Division Multiplexing Lightwave Networks Based upon Optical Code Conversion”, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 16, n. 7, pp.1309 – 1319, setembro de 1998.

- [4.6] Y. Zhang e L.K. Chen, “Performance Improvement by Code Conversion in a Reconfigurable Optical Code/Wavelength Routing Network”, *Asian-Pacific Optical and Wireless Communication Conference, (APOC)*, vol. 4584, n. 26, pp. 186-193, Beijing, China, Novembro de 2001.
- [4.7] D. Sampson, N. Wada, K. Kitayama e W. Chujo, “Demonstration of Reconfigurable All-Optical Code Conversion for Photonic Code-Division Multiplexing and Networking”, *Electronic Letters*, vol. 36, n. 5, pp. 445 – 447, março de 2000.
- [4.8] Y. G. Wen, L. K. Chen, K. P. Ho e F. Tong, “All-Optical Code Converter Scheme for OCDM Routing Networks”, *European Conference on Optical Communication (ECOC)*, paper P4.5, pp. 1088 – 1090, 2000.
- [4.9] Jiang et al, “Reconfigurable All-Optical Code Translation in Spectrally Phase-Coded O-CDMA”, *Journal of Lightwave Technology*, vol. 23, n. 6, pp. 1979 – 1990, junho de 2005.
- [4.10] D. Gurkan, S. Kumar, A. Sahin, A. Willner, K. Parameswaran, M. Fejer, D. Starodubov, J. Bannister, P. Kamath, e J. Touch, “All-optical wavelength and time 2-D code converter for dynamically-reconfigurable O-CDMA networks using a PPLN waveguide,” *Optical Fiber Conference (OFC)*, Atlanta, GA, 2003, Paper FD6.
- [4.11] M. Zhang, L. Wang e P. Ye, “All-Optical Xor Logic Gates: Technologies and Experiment Demonstrations”, *IEEE Optical Communications*, pp. S19 – S24, maio de 2005.
- [4.12] G. Agrawal, *Fiber-Optic Communication Systems*, Wiley InterScience, New York, 2002.
- [4.13] G. Agrawal, *Semiconductor Lasers: Past, Present and Future*, American Institute of Physics, New York, 1995.
- [4.14] Y. G. Wen, L. K. Chen, K. P. Ho and F. Tong, “Fundamental Limitation and Optimization on Optical Code Conversion for WDM Packet Switching Networks”, *Optical Fiber Conference (OFC)*, paper TuV5-1, 2001.
- [4.15] J. Salehi e C. Brackett, “Code Division Multiple-Access Techniques in Optical Fiber Networks-Part II: Systems Performance Analysis”, *IEEE Transactions on Communications*, vol. 37, n. 8, pp. 834 – 842, agosto de 1989.
- [4.16] R. Ormondroyd, e M. M. Mustapha, “Optically Orthogonal CDMA System Performance with Optical Amplifier and Photodetector Noise, *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 11, n.5, pp. 617 – 619, maio de 1999.

- [4.17] C. S. Ram Murthy and M. Gurusamy, *WDM Optical Networks: Concepts, Design, and Algorithms*, Prentice Hall, Upper Saddle River, 2002.
- [4.18] Y. G. Wen, Y. Zhang e L. K. Chen, “On Architecture and Limitation of Optical Multiprotocol Label Switching (MPLS) Networks Using Optical-Orthogonal-Code (OOC)/Wavelength Label”, *Optical Fiber Technology*, vol. 8, pp. 43 – 70, agosto de 2002.
- [4.19] Z. Zhang, J. Fu, D. Guo e L. Zhang, “Lightpath Routing for Intelligent Optical Networks” *IEEE Networks*, pp. 28 – 34, julho/agosto de 2001.
- [4.20] G. Xiao e Y. Leung, “Algorithms for Allocating Wavelength Converters in All-Optical Networks, *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 7, n. 4, pp. 545 – 557, agosto de 1999.
- [4.21] K. Venugopal, E. Rajan e P. Kumar, “Impact of Wavelength Converters in Wavelength Routed All-Optical”, *Computer Communication*, vol. 22, pp. 244 – 257, 1999.
- [4.22] S. Subramaniam, M. Azizoglu e A. Somani, “On Optimal Converter Placement in Wavelength-Routed Networks”, *IEEE/ACM Transactions Networking*, vol. 7, n. 5, pp. 754 – 766, October 1999.
- [4.23] G. Shen, T Cheng, S. Bose, C. Lu, T. Chai e H. Hosseini, “Approximate Analysis of Limited-Range Wavelength Conversion All-Optical Networks” *Computer Communications*, vol. 24, pp. 949 – 957, 2001.
- [4.24] Y. Zhang, L.K. Chen e C.K. Chan, “Performance Analysis of Multi-Dimensional Optical Routing Networks”, *Asia-Pacific Optical and Wireless Communications Conference (APOC)*, no. 4910, Shanghai, PRC, outubro de 2002.
- [4.25] R. Barry e P. Humblet, “Model of Blocking Probability in All-Optical Network with and without Wavelength Charges”, *IEEE Journal on Selected Areas in Communication*, vol. 14, pp. 858 - 868, 1996.
- [4.26] E. Ng e E. Sargent, “Optimum threshold detection in real-time scalable high-speed multi-wavelength optical code-division multiple-access LANs”, *IEEE Transactions on Communications*, vol. 50, no. 5, pp. 778 – 784, maio de 2002.
- [4.27] S. Huang, K. Baba, M. Murata and K. Kitayama, “Variable-bandwidth optical paths: comparison between optical code-labeled path and OCDM path”, *Journal Lightwave Technology*, vol. 24, no. 10, pp. 3563 – 3573, outubro de 2006.
- [4.28] D. Raychaudhuri, “Performance analysis of random access packet-switched code division multiple access systems,” *IEEE Transactions on Communications*, vol. 29, pp. 895 – 901, junho de 1981.

- [5.1] Z. Zhang, J. Fu, D. Guo e L. Zhang, “Lightpath Routing for Intelligent Optical Networks” *IEEE Networks*, pp. 28 – 34, julho/agosto de 2001.
- [5.2] A. Jajszczyk, “Automatically Switched Optical Networks: Benefits and Requirements”, *IEEE Optical Communications*, pp S10 – S15, fevereiro de 2005.
- [5.3] C. S. Ram Murthy e M. Gurusamy, *WDM Optical Networks: Concepts, Design, and Algorithms*, Prentice Hall, Upper Saddle River, 2002.
- [5.4] R. Barry e P. Humblet, “Model of Blocking Probability in All-Optical Network with and without Wavelength Charges”, *IEEE Journal on Selected Areas in Communication*, vol. 14, pp. 858 – 868, junho de 1996.
- [5.5] S. Subramaniam, M. Azizoglu and A. Somani, “All-Optical Networks with Sparse Wavelength Conversion”, *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 4, n. 4, pp. 544 – 557, agosto de 1996.
- [5.6] H. Zang, J. Jue, e B. Mukherjee, “A Review of Routing and Wavelength Assignment Approaches for Wavelength-Routed Optical WDM Networks”, *Optical Networks Magazine*, vol. 1, n. 1, pp. 47 – 60, janeiro de 2000.
- [5.7] R. Sabella, E. Iannone, M. Listani, M. Berdusco e S. Binetti, “Impact of Transmission Performance on Path Routing in All-Optical Transport Networks”, *Journal of Lightwave Technology*, vol. 16, n. 11, pp. 1965 – 1971, novembro de 1998.
- [5.8] B. Ramamurthy, D. Datta, H. Feng, J. Haritage and B. Mukherjee, “Impact of Transmission Impairments on the Teletraffic Performance of Wavelength-Routed Optical Networks”, *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 17, n. 10, pp. 1713 – 1723, outubro de 1999.
- [5.9] K. Kitayama, “Code Division Multiplexing Lightwave Networks Based upon Optical Code Conversion”, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 16, n. 7, pp.1309 – 1319, setembro de 1998.
- [5.10] H. Sotobayashi, W. Chujo e K. Kitayama, “Transparent Virtual Optical Code/Wavelength Path Network”, *IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 8, n. 3, pp.699 – 704, maio/junho de 2002.
- [5.11] Y. G. Wen, Y. Zhang e L. K. Chen, “On Architecture and Limitation of Optical Multiprotocol Label Switching (MPLS) Networks Using Optical-Orthogonal-Code (OOC)/Wavelength Label”, *Optical Fiber Technology*, vol. 8, pp. 43 – 70, agosto de 2002.

- [5.12] E. Mutafungwa e S. Halme, “Analysis of the Blocking Performance of Hybrid OCDM-WDM Transport Networks”, *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 34, n. 1, pp. 61 – 67, julho de 2002.
- [5.13] A. Belahlou, “Fiber Design Considerations for 40 Gb/s Systems”, *Journal of Lightwave Technology*, vol. 20, n. 12, pp. 2290 – 2305, dezembro de 2002.
- [5.14] G. Agrawal, *Nonlinear Fiber Optics*, Academic Press, 1995.
- [5.15] J. Strand, A. Chiu and R. Tkach, “Issues For Routing In The Optical Layer”, *IEEE Communications Magazine*, pp. 81 – 87, fevereiro de 2001.
- [5.16] M. Abbade, “Contribuição para o Estudo de Não-Linearidades em Fibras Ópticas Monomodo”, tese de doutorado, 2001, Faculdade de Engenharia Elétrica e Engenharia da Computação da Universidade Estadual de Campinas, Brasil.
- [5.17] J. Refi, “Optical Fibers For Optical Networking”, *Bell Labs Technical Journal*, pp. 246 – 261, Janeiro/março de 1999.
- [5.18] H. Yoshimura, K. Sato e N. Takachio, “Future Photonic Transport Networks Based on WDM Technologies”, *IEEE Communications Magazine*, pp. 74 – 81, fevereiro de 1999.
- [5.19] H. Sardesai, C. Chang e A. Weiner, “A Femtosecond Code-Division Multiple-Access Communication System Test Bed”, *Journal of Lightwave Technology*, vol. 16, n. 11, pp. 1953 – 1964, novembro de 1998.
- [5.20] J. Capmany e Gozalo Mallea, “Autocorrelation Pulse Distortion in Optical Fiber CDMA System Employing Ladder Networks”, *Journal of Lightwave Technology*, vol. 17, n. 4, pp. 570 – 578, abril de 1999.
- [5.21] D. Marcuse, “Pulse Distortion in Single-Mode Fibers”, *Applied Optics*, vol. 19, pp. 1653 – 1660, 1980.
- [5.22] P. Mendes, “Performance Assessment of Optical Networks with CDMA”, dissertação de mestrado, fevereiro de 1999, Instituto de Telecomunicações, Coimbra, Portugal.
- [5.23] K. Kitayama, H. Sotobayashi e N. Wada, “Optical Code Division Multiplexing (OCDM) and Its Applications to Photonic Networks”, *IEICE Transactions on Fundamentals*, vol. E82, n. 12, pp. 2616 – 2626, dezembro de 1999.
- [5.24] Yasutaka Igarashi e Hiroyuki Yashima, “Dispersion compensation for ultrashort light pulse CDMA communication systems”, *IEICE Transactions on Communications*, vol. E85-B, n. 12, pp. 2776 – 2784, dezembro de 2002.

- [5.25] C. Chua, F. Abbou, H. Chuah e S. Majunder, “Performance Analysis on Phase-Encoded OCDMA Communication System in Dispersive Fiber Medium”, *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 16, n. 2, pp. 668 – 670, fevereiro de 2004.
- [5.26] S. Majunder e A. Azhari, “Impact of Fiber Chromatic Dispersion on the BER Performance of an Optical CDMA IM/DD Transmission System”, *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 17, n. 6, pp. 1340 – 1342, junho de 2005.
- [5.27] F. Khaleghi e M. Kavehrad, “A New Correlator Receiver Architecture for Noncoherent Optical CDMA Networks with Bipolar Capacity”, *IEEE Transactions on Communication*, vol. 44, n. 10, pp. 1335 – 1339, outubro de 1996.
- [5.28] S. Lanne e E. Corbel, “Practical Considerations for Optical Polarization-Mode Dispersion Compensators”, *Journal of Lightwave Technology*, vol. 22, n. 4, pp. 1033 – 1040, abril de 2004.
- [5.29] A. Dal Forno, A. Paradisi, R. Passy e J. von der Weid, “Experimental and Theoretical Modeling of Polarization-Mode Dispersion in Single-Mode Fibers”, *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 12, n. 3, pp. 296 – 298, março de 2000.
- [5.30] Yasutaka Igarashi, Akira Kurosawa e Hiroyuki Yashima, “The effect of polarization-mode dispersion on coherent ultrashort light pulse CDMA communication system”, *Proc. The 7th International Symposium on Information Theory and its Applications (ISITA)*, Xi'an, China, pp. 343 – 346, outubro de 2002.
- [5.31] D. Nolan, X. Che e M. Li, “Fibers With Low Polarization-Mode Dispersion”, *Journal of Lightwave Technology*, vol. 22, n. 4, pp. 1066 – 1077, abril de 2004.
- [5.32] E.-G. Neumann, *Single-mode fibers fundamentals*, New York, Wiley-Interscience. 1988.
- [5.33] G. Foschini, L. Nelson, R. Jopson, e H. Kogelnik, “Statistics of Second-Order PMD Depolarization”, *Journal of Lightwave Technology*, vol. 19, n. 12, pp. 1882 – 1886, dezembro de 2001.
- [5.34] N. Gisin, J. P. von der Weid e J. Pellaux, “Polarizations Mode Dispersion of Short and Long Single-Mode Fibers”, *Journal of Lightwave Technology*, vol. 9, n., pp. 821 –, julho de 1991.
- [5.35] P. Ciprut, B. Gisin, N. Gisin, R. Passy, P. Von Der Weld, F. Prieto, C. Zimmer, “Second-order Polarization Mode Dispersion: Impact on Analog and Digital Transmissions”, *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 16, n. 5, pp. 757 – 771, maio de 1998.
- [5.36] Yafo Networks, Polarization Mode Dispersion Tutorial (International Engineering Consortium homepage: http://www.iec.org/online/tutorials/polar_mode) Último acesso em dezembro de 2005.

- [5.37] J. Rasmussen, A. Isomura e G. Ishikawa, “Automatic Compensation of Polarization-Mode Dispersion for 40 Gb/s Transmission Systems”, *Journal of Lightwave Technology*, vol. 20, n. 12, pp. 2101 – 2109, dezembro de 2002.
- [5.38] M Ali, D. Elie-Dit-Cosaque and L. Tancevisk, “Network Otimization with Transmission Impairment-Based Routing”, *Proc. 27th European Conference on Optical Communication (ECOC)*, Amsterdam, Holanda, 2001.
- [5.39] J. Salehi e C. Brackett, “Code Division Multiple-Access Techniques in Optical Fiber Networks-Part II: Systems Performance Analysis”, *IEEE Transactions on Communications*, vol. 37, n. 8, pp. 834 – 842, agosto de 1989.
- [5.40] F. Chung, J. Salehi and V. Wei, “Optical Orthogonal Codes: Design, Analysis, and Applications”, *IEEE Transactions on Information Theory*, Vol. 35, n. 3, pp. 595 – 604, maio de 1989.
- [5.41] M. Lima, A. Araújo, A. Cesar, “Optical Network Optimization with Transmission Impairments Based on Genetic Algorithm”. SBMO/IEEE MTT-S *International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC)*, vol. 1. pp. 361 – 365. 2003.
- [5.42] C. Munteanu e V. Lazarescu, “Global Search Using a New Evolutionary Framework: The Adaptive Reservoir Genetic Algorithm”, *Complexity International*, vol. 5, julho de 1998.
- [5.43] M. de Lima, “Alocação de Recursos e Roteamento de Tráfego em Telecomunicações por Meio de Algoritmo Genético: Rede Óptica WDM e Rede de Comunicação Móvel Celular”, tese de doutorado, 2005, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade Estadual de São Paulo, Brasil.
- [5.44] E. Mutafungwa, “Comparative Analysis of the Traffic Performance of Fiber-Impairment Limited WDM and Hybrid OCDM/WDM Networks”, *Photonics Network Communication*, vol.13, n. 9, pp. 53 – 66, setembro de 2006.
- [5.45] R. Santos-Filho, E. Martins e B. Borges, “Performance Evaluation of a Gigabit Optical CDMA Network for Two Distinct Families of Two-Dimensional Codes and Different Transmission Rates”, *Fiber and Integrated Optics*, vol. 26, n. 3, pp. 147–157, 2007.
- [5.46] T. Robertazzi, *Computers networks and systems: Queueing theory and performance evaluation*. Springer-Verlag, 2000, p. 284.
- [6.1] S. Kaneda, T. Uyematsu, N. Nagatsu e K. Sato, “Network Design and Cost Optimization for Label Switched Multilayer Photonic IP Networks”, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 23, n. 8, agosto de 2005.
- [6.2] C. S. Ram Murthy e M. Gurusamy, *WDM Optical Networks: Concepts, Design, and Algorithms*, Prentice Hall, Upper Saddle River, 2002.

- [6.3] Daniel J. Blumenthal et al., All-Optical Label Swapping Networks and Technologies, *Journal of Lightwave Technology*, vol. 18, n. 12, pp. 2058 – 2075, dezembro de 2000.
- [6.4] S. Yao e B. Mukherjee, “Advance in photonic packet switching: An Overview”, *IEEE Communications Magazine*, pp. 84 – 93, fevereiro de 2000.
- [6.5] K. Liu, C. Liu, J. Pastor, A. Roy e J. Wei, “Performance and Testbed Study of Topology Reconfiguration in IP over Optical Networks”, *IEEE Transactions on Communications*, vol. 50, n. 10, pp. 1662 – 1679, outubro de 2002.
- [6.6] X. Yu, J. Li, X. Cao, Y. Chen, e C. Qiao, “Traffic Statistics and Performance Evaluation in Optical Burst Switched Networks”, *Journal of Lightwave Technology*, vol. 22, n. 12, pp. 2722 – 2738, dezembro de 2004.
- [6.7] C. Qiao e M. Yoo, “Optical burst switching (OBS)-A new paradigm for an optical internet,” *Journal of High Speed Networks*, vol. 8, no. 1, pp. 69–84, 1999.
- [6.8] T. Battestilli e H. Perros, “An Introduction to Optical Burst Switching”, *IEEE Optical Communications*, pp. 510 – 515, agosto de 2003.
- [6.9] Ayan Banerjee et al, “Generalized Multiprotocol Label Switching: An Overview of Routing and Management Enhancements”, *IEEE Communications Magazine*, pp. 144 – 150, janeiro de 2001.
- [6.10] K. Kitayama e M. Murata, “Versatile Optical Code-Based MPLS for Circuit, Burst, and Packet Switchings”, *Journal of Lightwave Technology*, vol. 21, n. 11, pp. 2753 – 2764, novembro de 2003.
- [6.11] F. Farahmand, Q. Zhang e J. Jue, “Dynamic Traffic Grooming in Optical Burst-Switched Networks”, *Journal of Lightwave Technology*, vol. 23, n. 10, pp. 3167 – 3177, outubro de 2003.
- [6.12] S. K. Lee, H. S. Kim, J. S. Song, e D. Griffith, “A Study on Deflection Routing in Optical Burst-Switched Networks,” *Photonic Network Communications*, vol. 6, no. 1, pp. 51 – 59, janeiro de 2003.
- [6.13] W. Vokkarane e J. Jue, “Prioritized Burst Segmentation and Composite Burst-Assembly Techniques for QoS in Optical Burst-Switched Networks”, *IEEE Journal of Selected Areas in Communications*, vol. 21, n. 7, pp. 2062 – 2071, setembro de 2003.
- [6.14] K. Kitayama, S. Arakawa, I. Ogushi e M. Murata, “Ultrafast Optical-Code Based Path Setup for Optical Burst Switching”, *2002 IEEE/LEOS Summer Topi*, pp. TuA2 21 – 22 , 2002.

- [6.15] K. Kitayama, H. Sotobayashi and N. Wada, "Optical Code Division Multiplexing (OCDM) and its applications to Photonic Networks", *IEICE Transactions Fundamentals*, Vol. E82 A, n. 12, pp. 2616 – 2626, dezembro de 1999.
- [6.16] E. Mutafungwa e S. Halme, "Analysis of The Blocking Performance of Hybrid OCDM-WDM Transport Networks", *Microwave and Optical Technology Letters*, Vol. 34, n. 1, pp. 61 – 68, julho de 2002.
- [6.17] F. Chung, J. Salehi e V. Wei, "Optical Orthogonal Codes: Design, Analysis, and Applications", *IEEE Transaction on Information Theory*, vol. 35, no. 3, 595 – 604, maio de 1989.
- [6.18] Baldine, G. Rouskas, H. Perros e D. Stevenson, "Jumpstart: A Just-in-Time Signaling Architecture for WDM Burst-Switched Networks", *IEEE Communications Magazine*, pp. 82 – 89, fevereiro de 2002.
- [6.19] M. Duser e Polina Beyvel, "Analysis of Dynamically Wavelength-Routed Optical Burst Switched Network Architecture", *Journal of Lightwave Technology*, vol. 20, no. 4, pp. 574 – 585, abril de 2002.
- [6.20] A. Zalesky, E. Wong, M. Zukerman, H. Vu e R. Tucker, "Performance Analysis of an OBS Edge Router", *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 16, no. 2, pp. 695 – 697, fevereiro de 2002.
- [6.21] Y. Sun, T. Hashiguchi, V. Minh, X. Wang, H. Morikawa e T. Aoyama, "Design and Implementation of an Optical Burst-Switched Network Testbed", *IEEE Optical Communications*, S48 – S55, novembro de 2005.
- [6.22] F. Masetti et al, "Design and Implementation of a Multi-Terabit Optical Burst/Package Router Prototype," *Optical Fiber Conference (OFC)*, Anaheim, CA, Mar. 2002, pp. FD1-1–FD1-3.
- [6.23] I. Baldine et al, "Just-in-Time Optical Burst Switching Implementation in the ATDnet All-Optical Networking Testbed," *Proc. GLOBECOM 2003*, San Francisco, CA, pp. 2777 – 81, dezembro de 2003.
- [6.24] A. Sahara et al, "Demonstration of Optical Burst Switching Network Utilizing PLC and MEMS Switches with GMPLS Control," *European Conference on Optical Communication (ECOC)*, Stockholm, Sweden, pp. 896–97, setembro de 2004.
- [6.25] S. Arakawa, M. Murata e K. Kitayama, "One-Way Reservation Scheme Using Optical Code Processing For Fast Data Transfer In Wdm Networks" in *Proc. Conference on Optical Network Design and Modeling (ONDM)*, pp. 1073 – 1088, 2003.

- [6.26] K. Kitayama et. al., “Optical Burst Switching Testbed in Japan”, *Optical Fiber Conference OFC’2005*.
- [6.27] K. Kitayama et al., “Photonic Network R&D Activities in Japan—Current Activities and Future Perspectives”, *Journal of Lightwave Technology*, vol. 23, n. 10, pp. 3404 – 3418, outubro de 2005.
- [6.28] M. Yoo, C. Qiao e S. Dixit, “Qos Performance of Optical Burst Switching in IP-Over-WDM Networks”, *IEEE Journal of Selected Areas in Communications*, vol. 18, n. 10, pp. 2062 – 2071, outubro de 2000.
- [6.29] H. Vu e M. Zukerman, “Blocking probability for priority classes in optical burst switching networks,” *IEEE Communications Letters*, vol. 6, pp. 214–216, 2002.
- [6.30] L. Xu, H. Perros, e G. Rouskas, “A queueing network model of an edge optical burst switching node,” in *Proc. INFOCOMM*, vol. 3, pp. 2019–2029, 2003.
- [6.31] K. Kitayama e N. Wada “Photonic IP Router”, *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 11, n. 12, pp. 1689 – 1691, dezembro de 1999.
- [6.32] J. Teng e G. Rouskas, “A Comparison of the JIT, JET and Horizon Wavelength Reservation Schemes on a Single OBS Node”, in *Proc. The First International Workshop on Optical Burst Switching (WOBS)*, 2003.
- [6.33] K. Dolzer, C.M. Gauger, J. Späth e S. Bodamer, “Evaluation of reservation mechanisms for optical burst switching”, *AEÜ International Journal of Electronics and Communicatios*, Vol. 55, No. 1, pp. 1 – 6, janeiro de 2001.
- [6.34] F. Callegati, H. Cankaya, Y. Xiong e M. Vandenhoute, “Design Issues of Optical IP Routers for Internet Backbone Applications”, *IEEE Communications Magazine*, pp. 124 – 128, dezembro de 1999.